



## **Menetelmiä liikkuvan laserkeilauksen aineistojen geometrisen laadun parantamiseen metsäympäristössä**

Aalto-yliopiston insinööritieteiden korkeakoulun  
maankäyttötieteiden laitoksella tehty diplomityö

Espoo, lokakuu 2014

Tekniikan kandidaatti Saija Simola

Valvoja: Professori Henrik Haggrén  
Ohjaaja: Tekniikan tohtori Antero Kukko

---

**Tekijä** Saija Simola

---

**Työn nimi** Menetelmiä liikkuvan laserkeilauksen aineistojen geometrisen laadun parantamiseen metsäympäristössä

---

**Koulutusohjelma** Geomatiikka

---

**Pää-/sivuaine** Fotogrammetria ja kaukokartoitus

---

**Professuurikoodi** Maa-57

---

**Työn valvoja** Professori Henrik Haggrén

---

**Työn ohjaaja** Tekniikan tohtori Antero Kukko

---

**Päivämäärä** 02.10.2014

---

**Sivumäärä** 75 s.

---

**Kieli** Suomi

---

### Tiivistelmä

Liikkuvalla laserkeilauksella voidaan mitata sellaisessa ympäristössä, jota muut laserkeilaimet eivät tavoita tai jossa niiden käyttäminen on hidasta. Ilmalaserkeilaus ei tavoita puiden runkoja ja maalaserkeilain on hankala sekä hidaskin liikuttaa. Laserkeilaimella mitattujen kohteiden pisteiden sijainnit saadaan tallennettua oikein vain, jos laserkeilaimen sijainti mittaushetkellä tunnetaan oikein. Liikkuvassa kartoituksessa laserkeilaimen sijainti määritetään GNSS-satelliittipaikannuksen (Global Navigation Satellite System) ja inertipaikannuksen yhdistelmän avulla. MLS-keilaimen kulkema laskennallinen reitti eli trajektoriatuotetaan GNSS-IMU-paikannuslaitteiston tallentamien havaintojen avulla. Metsäympäristössä GNSS-yhteys satelliitteihin saattaa kadota ajoittain eikä pelkkä inertipaikannus pysty pitämään paikannustarkkuutta riittävän hyvänä pitkiä aikoja. Tällöin pisteiden sijainti suhteessa todelliseen sijaintiin vääristyy eli geometrinen laatu heikkenee.

MLS-aineiston geometrian parantamiseksi trajektorista etsittiin tutkimuksessa leikkauskohdista. Leikkauskohdat olivat kohtia, joissa sama kohta maastosta oli mitattu ainakin kahtena eri ajanhetkenä. Tällaisista leikkauskohdista muodostettiin samasta alueesta kaksi erilaista pistejoukkoa. Leikkauskohtien pistejoukkoja sovitettiin yhteen. Näin pistejoukot siirtyivät lähemmäs toisiaan ja niiden keskinäinen sijaintivirhe saatiin pienennettyä. Tutkimuksen koeaineistona käytettiin liikkuvalla laserkeilaimella Akhka R2:lla mitattuja pistepilviaineistoja ja trajektoria. Vertausaineistona käytettiin maalaserkeilaimella mitattua pistepilviaineistoa samalta alueelta. Yhteensovittaminen toteutettiin Matlab-ohjelmalla. Pistepilvien käsittely ja tulosten vertailu tehtiin TerraScan-ohjelmalla.

Tutkimuksessa havaittiin, että aineistojen geometrinen laatua metsäympäristössä voitiin parantaa yhteensovituksella N- ja korkeussuunnissa. Parannusta tapahtui metsäympäristössä sisäisesti PLS-koeaineistossa sekä suhteessa TLS-vertausaineistoon. Korkeussuuntainen parannus metsäympäristössä oli keskiarvoltaan 0,01 m TLS-vertausaineistoon nähden ja 0,12 m PLS-koeaineiston sisäisessä vertailussa. Korkeussuunnassa 71 % metsäalueen pistejoukoista parantui PLS-koeaineiston ja TLS-vertausaineiston välisessä vertailussa ja PLS-koeaineiston sisäisessä vertailussa kaikki metsäalueen pistejoukot parantuivat.

N-suuntainen parannus metsäympäristössä oli keskiarvoltaan 0,01 m TLS-vertausaineistoon nähden ja 0,02 m PLS-koeaineiston sisäisessä vertailussa. Yhteensovituksen jälkeen metsäalueella N- ja korkeussuuntainen geometrinen laatu oli parempi koeaineiston sisäisessä vertailussa kuin vertausaineistoon nähden. Yhteensovitus paransi metsäympäristön lisäksi koko alueen geometrinen tarkkuutta korkeussuunnassa. Heading-kiertokulmat huonontuivat kaikissa vertailuissa ja alueilla yhteensovituksen myötä. Geometrisen laadun parantaminen on tärkeää, jotta MLS-keilauksia voidaan tehdä luotettavasti metsäympäristössä.

---

**Avainsanat** Laserkeilaus, liikkuva, MLS, TLS, ALS, PLS, metsien kartoitus, 3D, tarkkuus, pistepilvi, GNSS/INS, GPS, paikannus, geometrinen laatu

---



---

**Author** Saija Simola

---

**Title of thesis** Methods for improving geometric quality of mobile laser scanning data in forest environment

---

**Degree programme** Degree Programme in Geomatics

---

**Major/minor** Photogrammetry and Remote Sensing

---

**Code of professorship** Maa-57

---

**Thesis supervisor** Professor Henrik Haggrén

---

**Thesis advisor** Doctor of Science Antero Kukko

---

**Date** 02.10.2014

---

**Number of pages** 75 p.

---

**Language** Finnish

---

### **Abstract**

Mobile laser scanner can measure environment, where other laser scanners cannot or where they are hard to use. Airborne laser scanning can't measure tree stems from above. It is hard and slow to move terrestrial laser scanner. If laser scanner's position is known, only then points from objects can be saved with correct position. Position of laser scanner can be defined with combining global navigation satellite system and inertia-system in mobile mapping. Computational route of MLS is called trajectory. Trajectory can be defined with GNSS-IMU-observations. GNSS cannot be connected to satellites in forest environment all the time. Inertia-positioning cannot keep correct positioning quality for long. Then it is not possible to reliably know where points should be mapped in a real world. That means that geometric quality of the data decreases.

Intersections within the trajectory were sought for improving geometric quality of MLS-point cloud. Intersections were points, where laser scanner measured at least twice in different times. It is possible to find two different set of points around those intersections for mutual matching. By matching the set of points it is possible to reduce positioning error between the set of points. The point cloud and corresponding trajectory for this study were measured by mobile laser scanner Akhka R2. Reference point cloud was measured with terrestrial laser scanner from the same area. Matlab-program was used to implement the matching method. TerraScan-program was used for processing point clouds and comparing results.

The geometric quality of the point clouds was improved for forest environment in N- and elevation directions. Improvement took place in forest environment between the test and the reference point clouds. Improvement in the elevation direction was approximately 0,01 m between the test and the reference point clouds and 0,12 m inside the test point clouds in forest environment. In the elevation direction 71 % of the set of points between the test and the reference point clouds and all of the set of points inside the test point clouds were improved in forest environment.

Improvement in the N-direction was approximately 0,01 m between the test and the reference point clouds and 0,02 m inside the test point clouds in forest environment. The geometric quality in N- and elevation directions was better inside the test point cloud than between the test and reference point clouds in forest environment by using the implemented matching method. The geometric quality of the whole dataset was improved in elevation direction by using the implemented matching method. The geometric quality of the whole dataset got worse in heading-angles by using the implemented matching method. It is important to improve geometric quality, so that MLS can be used reliably in the forest environment.

---

**Keywords** Laser scanning, mobile, MLS, TLS, ALS, PLS, forest mapping, 3D, accuracy, point cloud, GNSS/INS, GPS, positioning, geometric quality

---

## Esipuhe

Minua kiehtoo laserkeilauksessa sen lukemattomat haasteet ja mahdollisuudet uusien sovellusten kehittämiseen ja hyödyntämiseen samalla kun vanhoihin käyttökohteisiin saadaan luotua lisää tarkkuutta. Ihminen pitää kohteiden visuaalisesta mallintamisesta – etenkin oman itsensä näkemisestä mallinnettuna. Mallien kautta ihminen voi nähdä itsensä tavalla, jota hän ei ole ennen kokenut. Ihmisten mallintamista on hyödynnetty jo ainakin vaateteollisuudessa. Monet eivät edes ajattele, kuinka laserkeilauksen sovelluksia on heidän ympärillään koko ajan käytössä. Esimerkkinä voidaan mainita Microsoftin Kinect-laite, joka toimii laserkeilaimen tavoin.

Laserkeilausta voitaisiin hyödyntää enemmän myös elokuva- ja peliteollisuudessa. Itse pidän esimerkiksi Napapiirin pikajuna -elokuvasta. Siinä Tom Hanks esittää itse lähes kaikki pääroolit – jopa lasten roolit. Hänen kasvojensa ja vartalonsa liikkeet on tallennettu ja niiden päälle on laitettu mallinnettu hahmo. Näyttelijän tekemät liikkeet ovat elävämmän ja aidomman tuntuisia kuin tietokoneiden luomat mallit. Laserkeilattujen ihmisten liikkeitä voi käyttää uudestaan hyödyksi jopa heidän jo siirryttyä viimeisille leposijoilleen. Napapiirin pikajunan kuvausten ollessa vielä kesken näyttelijä Brandon Lee kuoli. Hänen aiemmin keilattuja liikkeitään pystyttiin hyödyntämään ja hahmo saatiin näin viimeisteltyä loppuun (Kurtz L., 2005).

Peliteollisuudessa laserkeilausta voisi hyödyntää luomalla esimerkiksi aitoja peliympäristöjä. Toiminta- ja autopelit saisivat uusia ulottuvuuksia, kun käyttäjä voisi tunnistaa pelin ympäristön todellisuudesta. Ilmeisesti ainakin vielä tällä hetkellä pelimaailmassa graafikkosten luomuksia pidetään parempina kuin laserkeilauksilla saatavia aineistoja. Toimivinta olisi yhdistää nämä taitojen kirjat toisiinsa. Onneksi elokuvamaailmassa on uskallettu jo lähteä toteuttamaan entistä elävämpiä elokuvakokemuksia laserkeilauksen avulla. Sovelluksissa on oikeastaan vain kekseliäisyys ja mielikuvitus rajana.

Pidän myös metsiä tärkeinä. Olenhan niissä pienenä leikkinyt ja isompana taivaltanut. Metsät ovat tarjonneet rauhan ja mielenkiintoisen äänimaailmansa lisäksi myös marjojen antia. Parempien sovellusten avulla autamme ihmisten lisäksi myös ylläpitämään metsien ja luonnon monimuotoisuutta.

Haluan vielä kiittää työni valvojaa professori Henrik Haggrénia Aalto-yliopistosta sekä ohjaajaa tekniikan tohtori Antero Kukkoa Geodeettiselta laitokselta. Kiitokset ansaitsevat myös kaikki muut Geodeettisen laitoksen ja Aalto-yliopiston työntekijät (opintohallinnosta luennoitsijoihin), jotka ovat auttaneet minua opintopolullani ja työni teossa. Tärkeimmät ja rakkaimmat kiitokseni kuuluvat perheeni korvaamattomille jäsenille: äidilleni Merville, iskälleni Jukalle, pikkusiskolleni Ainille, pikkuveljilleni Johanille ja Pertulle sekä aviomiehelleni Tuomakselle.

Kirkkonummella 28.8.2014,

Saija Simola

# Sisällys

Esipuhe

Lyhenneluettelo

1. Johdanto.....	1
1.1 Aiheen esittely.....	1
1.2 Tausta ja tavoitteet.....	3
1.3 Työn rakenne.....	4
2. Laserkeilaimet .....	5
2.1 Laserkeilainten toimintaperiaate.....	5
2.1.1 Pulssilaserkeilain .....	5
2.1.2 Vaihe-erolaserkeilain .....	6
2.1.3 Radiometriset ominaisuudet.....	6
2.2 Erilaiset laserkeilaimet.....	7
2.2.1 Ilmalaserkeilain .....	7
2.2.2 Maalaserkeilain .....	7
2.2.3 Liikkuva laserkeilain.....	8
2.2.4 Henkilökohtainen laserkeilain.....	10
2.3 Laserkeilainten sovellukset.....	10
3. Liikkuvien laserkeilainten tarkkuus ja virhetekijät .....	12
3.1 Liikkuvien laserkeilainten paikannus.....	12
3.1.1 GNSS.....	12
3.1.2 IMU.....	13
3.1.3 Trajektori .....	14
3.1.4 Paikannusmenetelmien tarkkuudet.....	14
3.2 MLS-pistepilvien laatu.....	15
3.2.1 Virheet pistepilvessä .....	15
3.2.2 Aineistojen yhdistäminen ja muut laskennan virhetekijät.....	16
3.3 Laitteiden virheet.....	17
3.3.1 Laitteiden kalibrointi .....	17
3.3.2 Laitteiden ominaisuuksien virhetekijät.....	18
3.4 Muut virhetekijät.....	19
4. Tutkimuksen aineistot ja menetelmät .....	20
4.1 TLS-vertausaineisto.....	20

4.2 PLS-koeaineisto.....	21
4.3 Maanpintaluokittelu.....	23
4.4 Trajektorin leikkauskohtien haku.....	25
4.5 Yhteensovitusmenetelmät.....	28
4.5.1 TerraMatch-ohjelma .....	28
4.5.2 ICP .....	29
4.5.3 Menetelmät tarkkuuden arviointiin.....	31
5. Tulokset ja tarkastelu .....	34
5.1 Tutkimuksen tulokset.....	34
5.1.1 Trajektorin leikkauskohtien haun tulokset .....	37
5.1.2 ICP-yhteensovituksen korkeussuuntaiset tulokset PLS-koeaineiston ja TLS- vertausaineiston väliltä .....	38
5.1.3 ICP-yhteensovituksen korkeussuuntaiset tulokset PLS-koeaineiston sisäisistä vertailuista .....	43
5.1.4 ICP-yhteensovituksen tulokset E-, N- ja h-suuntien sekä heading-kiertokulman vertailuista.....	49
5.2 Tulosten tarkastelu.....	60
6. Johtopäätökset.....	64
Lähdeluettelo .....	70
Liitteet	
Liite 1. Vertailutaulukot (1/20)	

## Lyhenneluettelo

ALS	Airborne Laser Scanner/Scanning – Ilmalaserkeilain/-keilaus
ATV	All-Terrain Vehicle – Laserkeilauksessa käytetty mönkijä
CLS	Car Laser Scanner/Scanning – Autolaserkeilain/-keilaus
GNSS	Global Navigation Satellite System – Satelliittipaikannusjärjestelmä
GPS	Global Positioning System – Satelliittinavigointijärjestelmä
ICP	Iterative Closest Point – Pintojen yhteensovitus -menetelmä
IMU	Inertial Measurement Unit – Laite, joka toteuttaa INS-realisaation
INS	Inertial Navigation System – Inertia-järjestelmä, joka mittaa liikettä ja paikkaa
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – Laservalo
LAS	LASer File Format – Laserpistepilvi-tiedostojen pakattu tiedostomuoto
LiDAR	Light Detection And Ranging – Laservalolla toimiva tutka
MLS	Mobile Laser Scanner/Scanning – Liikkuva laserkeilain/-keilaus
PLS	Personal Laser Scanner/Scanning – Henkilökohtainen laserkeilain/-keilaus
PRF	Pulse Repetition Frequency – Pulssintoistotaajuus
PS	Phase Shift – Vaihe-ero-laserkeilausmenetelmä
RMS	Root-Mean-Square – Neliöllinen keskiarvo
RMSE	Root-Mean-Square Error – Keskineliövirheen neliöjuuri
RTK	Real Time Kinematic – Tosiaikainen kinemaattinen mittaus
RXI	Rxi File Format – Laserpistepilvi-tiedostojen pakkaamaton tiedostomuoto
SD/STD	Standard deviation – Keskihajonta
SVD	Singular Value Decomposition - Pääakselihajotelma
TLS	Terrestrial Laser Scanner/Scanning – Maalaserkeilain/-keilaus
TOF	Time of Flight – Pulssi-laserkeilausmenetelmä
UAV	Unmanned Aerial Vehicle – Miehittämätön ilma-ajoneuvo
VRS	Virtual Reference Station – Virtuaalitukiasema

# 1. Johdanto

Tässä luvussa kerrotaan lyhyesti diplomityöstä kokonaisuutena. Ensimmäisessä kappaleessa 1.1 esitellään diplomityön aihe. Aiheeseen syvennytään tarkemmin työn myöhemmissä luvuissa. Kappaleessa 1.2 kuvataan aiheen tausta sekä asetetaan tutkimuksen tavoitteet. Työn rakenne on esitetty kappaleessa 1.3.

## 1.1 Aiheen esittely

Laserkeilauksella tuotetaan nopeasti ja luotettavasti kolmiulotteista tietoa ympäristöstä. Laserkeilain (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, LASER) lähettää ja vastaanottaa lasersäteen sekä mittaa säteen suunnan. Lasersäteen kulkemasta matkasta selvitetään mitatun kohteen etäisyys laserkeilaimen. Etäisyydestä lasketaan mitatun kohteen sijainti, kun keilaimen sijainti ja säteen suunta tunnetaan. Laserkeilaus ja sen myötä kehitetyt sovellukset näkyvät jo jokapäiväisessä käytännön elämässä. Laserkeilainten sovelluksia löytyy aina kotien pelikonsoleista metsien inventointiin ja topografiseen korkeusmallituotantoon sekä kartoitukseen.

Laserkeilaus on uusi menetelmä, vaikka Heritage ja Lagen (2009) mukaan Albert Einstein esitti ensimmäiset ideat lasersäteestä jo vuonna 1917. Ensimmäinen laseretäisyysmittaus toteutettiin vuonna 1962 (Price ja Uren, 1989). Siihen nähden laserkeilauksella kesti aika kauan rantautua Suomeen käyttöön. Liang et al. (2014 a) mukaan ensimmäiset kaupalliseen käyttöön suunnitellut ALS-keilaimet tulivat kartoituskäyttöön vuonna 1993. Käytännössä ne saatiin Suomessa käyttöön vasta 2000-luvun alussa. Esimerkkinä varhaisemmista menetelmistä voidaan mainita ilmakuvat, joita on saanut Suomessa jo 70 vuoden ajan (Korpela ja Välimäki, 2007).

Ensimmäinen kaupallinen TLS-keilain (Terrestrial Laser Scanning) tuli markkinoille vuonna 1998. Ensimmäinen kaupallinen MLS-keilain (Mobile Laser Scanning) StreetMapper ilmestyi vuonna 2006. Vuonna 2010 syntyi ajatus hyödyntää MLS-keilaimia metsien kartoittamisessa (Liang et al., 2014 a). MLS-keilaus on korvaamassa sekä tuomassa uutta ja tarkempaa informaatiota aiemmin käytettyjen työläiden ALS- (Airborne Laser Scanning) ja fotogrammetristen menetelmien yhdistelmien tilalle.

Satelliitti- ja ilmakuvaukset eivät tuota suoraan 3D-tietoa, toisin kuin laserkeilaus. Korpelan ja Välimäen (2007) mukaan ilmakuvien etuina ovat tarkasti saatavat kohteiden ääriviihat ja taitekohdat. Fotogrammetriassa pisteiden pitää tyypillisesti näkyä aina vähintään kahdelta kuvalta, jotta ne saadaan mitattua 3D-pisteiksi. Peitteisillä alueilla suuri määrä pisteitä jää jopa kokonaan havaitsematta, koska kohteet näkyvät kuvilta huonosti (Holopainen, Hyyppä ja Vastaranta, 2013, s. 13). Myös Kaartisen (2013, s. 48) mukaan puiden sijainnin ja korkeuden määrittäminen onnistuu laserkeilauksella tarkemmin kuin fotogrammetrisin menetelmin. Puiden sijainnin ja korkeuden määrittäminen vaatii tyypillisesti maanpintamallin. Maanpintamallin muodostaminen metsäympäristössä on haastavaa ylhäältäpäin otetuista satelliitti- ja ilmakuvista, koska puut peittävät kuvissa maanpinnan.

Metsät ovat yksi Suomen tärkeimmistä luonnonvaroista. Yhdistyneiden kansakuntien elintarvike- ja maatalousjärjestön (Food and Agriculture Organization of the United



Nations) (FAO, 2010) mukaan koko Suomen pinta-alasta yhteensä 77 % on metsää ja puustoa. Keskimäärin joka viidennellä suomalaisella on metsää omistuksessaan. On tärkeää kerätä metsistä tarkoituksenmukaista tietoa, jotta metsiä voidaan hoitaa hyvin. Siksi metsien tutkimukseen ja sovellusten kehittämiseen kannattaa panostaa. Laserkeilauksen sovelluksista on kerrottu lisää luvussa 2.3 Laserkeilainten sovellukset. Laserkeilauksella saadaan nopeasti ajantasaista, tarkkaa ja luotettavaa tietoa metsien tilasta sekä metsävaroista. Laserkeilauksella saadaan uuden tuotetun aineiston lisäksi päivitettyä vanhoja, metsän aiemmista vaiheista mitattuja aineistoja. Metsien laserkeilauksella selvitetään esimerkiksi puiden korkeudet, kasvu, läpimitat, sijainnit, runkoluku, biomassa, pohjapinta-alat, runkotilavuudet, muutostulkintaa sekä ylipäätään metsän inventaario.

Metsäalueiden inventoinneissa on käytetty aiemmin tyypillisesti kuvioittaista arviointia (Suvanto et al., 2005). Yksityismetsien omistajat tarvitsevat kasvupaikka- ja puustotietoja 10–20 vuoden välein metsäsuunnittelua varten (Haara ja Korhonen, 2004). Kuvioittaisella arvioinnilla tuotettu tieto on jo valmistumishetkellään jopa 5–10 vuotta vanhaa (Suvanto et al., 2005). Tällä vanhalla tiedolla on inventoitu silti vuosittain noin miljoona hehtaaria yksityisten metsänomistajien metsiä. Menetelmän korkeiden kustannusten lisäksi kuviopohjaisen puuston kokonaistilavuuden arvioinnissa on päästy vain 15–30 % keskivirheeseen (Suvanto et al., 2005). Laserkeilauksella vastaava luku on vain 9,3–25 % (Suvanto et al., 2005). Puiden pituudet ja läpimitat ovat mitattu myös esimerkiksi laserrelaskoopilla ja laserkameralla (Vastaranta, Holopainen, Kaartinen, Hyyppä ja Hyyppä, 2009). Näiden menetelmien haittapuolena on se, että laitteiden käyttö vaatii koko ajan käyttäjän läsnäoloa. Käyttäjä on vastuussa myös siitä, että kaikki kohteet mitataan samalla tavalla.

ALS-keilauksella saadaan tietoa etenkin puuston pituusrakenteesta. ALS-keilaus ei aina tavoita puiden latvustojen alle jäävää aluspuustoa. Tällöin ei saada kattavaa tietoa esimerkiksi runkojen ja latvuksen leveystiedoista tai aluskasvillisuudesta. Myös aineiston pistetiheys heikkenee mittausetäisyyden kasvaessa laserkeilaimeen nähden. Etenkin nuoret puut jäävät jopa kokonaan havaitsematta riittämättömän pistetiheyden tai harvan latvustonsa vuoksi (Liang et al., 2014 a). Henkilökohtaisella (Personal Laser Scanning, PLS), liikkuvalla (Mobile Laser Scanning, MLS) ja maalaserkeilauksella (Terrestrial Laser Scanning, TLS) mitataan metsää myös latvustojen alapuolelta. Silti TLS-keilaimella mitattuun aineistoon jää runkojen aiheuttamia katvealueita, koska TLS-keilain tuottaa mittausaineistonsa yhdestä perspektiivistä kerrallaan.

MLS- ja PLS-keilaimet ovat järjestelmiä, joilla suoritetaan liikkuvaa kartoitusta. Niillä mitataan hyvin myös ALS- ja TLS-keilauksilla havaitsematta jääneitä puita (Jaakkola et al., 2010; Liang et al., 2014 a), mikäli mittausreitti toteutetaan tarkoitukseen sopivalla tavalla. TLS-mittaus useammasta kojeasemasta parantaa tyypillisesti TLS-aineistosta saatavia tuloksia (Liang et al., 2014 a), mutta lisää samalla työmäärää mittauksen aikana ja jälkiprosessoinnissa. Lisäksi näkymien määrä metsäkuviolla jää silti lukumääräisesti rajoittuneeksi.

PLS- ja MLS-keilainten haasteena metsäympäristössä on latvuston aiheuttama paikannussatelliittisignaalien vaimeneminen ja sitä kautta laseraineiston paikannuksen epävarmuudesta seuraava geometrisen tarkkuuden huonontuminen (Liang et al., 2014 a). Satelliittien huono näkyvyys vaikuttaa myös TLS-aineistojen tarkkuuteen, sillä TLS-aineistojen georeferointiin käytettävien tähtysten sijainninmäärittäminen RTK-GNSS- (Real Time Kinematic-Global Navigation Satellite System) ja VRS-GNSS (Virtual Reference Station-Global

Navigation Satellite System)-tekniikoilla riippuu vastaanotettavan paikannussignaalin saatavuudesta (Kukko, 2013). Metsien lisäksi satelliittien huono näkyvyys aiheuttaa haasteita esimerkiksi rakennetussa ympäristössä, kuten kaupunkialueilla tai tunneleissa (Cronvall, Kråknäs ja Turkka, 2012). Aineistojen sijainti suhteessa ulkoiseen koordinaatistoon tunnetaan oikein vain, jos satelliiteista saadaan sijaintitietoa. Ilman oikeaa sijaintitietoa esimerkiksi aineistojen keskinäinen yhdistäminen tuottaa hankaluuksia.

Vastaranta et al. (2009) mukaan TLS-keilaimilla tunnistetaan puun sijainti paremmalla kuin 1 cm tarkkuudella. PLS-keilaimella puun paikannuksen keskivirheeksi on saatu 0,38 m (Liang et al., 2014 a). Kauempana keilaimesta olevat kohteet heijastavat takaisin vähemmän pisteitä, riippuen käytetystä kulmaresoluutiosta ja kohteen kirkkaudesta käytetyllä aallonpituudella. Kirkkaudesta riippuen kohteen malli jää epätarkaksi. Toisaalta lähellä keilainta oleva runko tai muu kasvillisuus peittää puuston muiden osien näkyvyyden piste-pilvessä. Joskus siis lähellä olevista puista heijastuu kokonaisuutena kaukana olevia vähemmän pisteitä (Liang et al., 2014 a).

Kannettavalla ja ajoneuvoalustaisella MLS-keilaimella voidaan tyypillisesti mitata sellaisissa paikoissa, joihin ilmasta käsin ei ole mahdollista nähdä. Kukko (2013, s. 27) toteaa MLS-keilainten lisännen sovelluksia, parantaneen aineistojen hankintahintoja, mittaus-tarkkuutta ja kohteesta tehtyjen havaintojen yksityiskohtaisuutta, luoden uuden aikakauden liikkuvassa kartoituksessa. MLS-keilauksen avulla saadaan kolmiulotteista tietoa aiempia menetelmiä nopeammin ja tehokkaammin laajemmilta alueilta. MLS-keilauksen menetelmien ja prosessien kehittäminen edelleen on tärkeää, jotta säästetään aikaa ja rahaa, saadaan parempilaatuiset aineistot yhteiskunnan eri toimintojen tarpeisiin (Kukko, 2013) sekä voidaan paremmin huomioida toimintojen taloudelliset ja ympäristöön kohdistuvat vaikutukset kestäväällä tavalla.

## 1.2 Tausta ja tavoitteet

MLS-keilaimella toimitaan monenlaisissa ympäristöissä. Aineiston pisteiden sijainti tallennetaan oikein vain, jos laserkeilaimen sijainti mittaushetkellä tunnetaan oikein. Laserkeilaimen sijainti määritetään GNSS-satelliittipaikannuksen (Global Navigation Satellite System) ja inertiapaikannuksen yhdistelmän avulla. Metsäympäristössä GNSS-yhteys satelliitteihin katoaa ajoittain (Liang et al., 2014 a). Tällöin laserkeilaimen oikeaa sijaintia ei enää välttämättä tiedetä ja paikan ratkaisu jälkilaskennassa riippuu ainoastaan inertiamittausyksikön (IMU) suorituskyvystä (Liang et al., 2014 a).

Koko MLS-keilaimen kulkema reitti tallennetaan ja lasketaan GNSS-IMU-paikannuksen tuottamien havaintojen avulla. Tätä kuljettua ja mittalaitteiden havainnoista laskettua reittiä kutsutaan trajektoriksi. Trajektorin sijaintivirheen suuruus riippuu suurelta osin satelliittipaikannuksen signaalikatkojen ajallisista kestoista ja käytetyn inertiamittausyksikön suorituskyvystä. Inertiapaikannus antaa tyypillisesti tarkan ratkaisun vain suhteellisen lyhyen ajan. Tästä johtuen keilaimen trajektorin virhe on luonteeltaan dynaaminen ja erisuuruinen eri osissa mittausaluetta ja eri ajanhetkillä. Trajektorin laatu vaikuttaa suoraan tuotetun pistepilven geometriseen laatuun, joten menetelmät trajektorin korjaamiseksi ovat tarpeen. Tällöin pistepilvien sijaintitarkkuutta ja sisäistä yhtenäisyyttä voidaan parantaa.

Tutkimuksen tavoitteena oli löytää sopivia ja luotettavia menetelmiä sekä soveltaa niitä MLS-keilauksella saatujen aineistojen geometrisen laadun parantamiseen metsäympäris-

tössä. Geometriseksi laaduksi kutsutaan yksittäisten kohteiden ja pisteiden sijaintien tarkkuutta aineistossa. Hyvällä geometrisella laadulla kohteet sijaitsevat oikeissa paikoissa ulkoisiin koordinaatteihin ja toisiinsa nähden. Paikannusvirhettä oli havaittu aikaisemmin erityisesti metsäympäristössä (Liang et al., 2014 a). Geometrisen laadun parantaminen on tärkeää, jotta MLS-aineistoja voidaan käyttää luotettavasti puustotunnusten arviointiin ja yksittäisten puiden runkojen runkokäyrien mallinnukseen ja niistä saatuja tuloksia voidaan pitää oikeina.

Geometrisen laadun parantaminen tapahtui pistepilviaineiston jälkikäsittelyssä. Tutkimuksessa käytetty koetyöaineisto oli liikkuvalla selkäreppulaserkeilaimella Akhka R2:lla mitattuja pistepilviä ja reitti- eli trajektoritietoja. Koeaineisto oli mitattu Geodeettisen laitoksen ympäristöstä. Pistepilvet sisälsivät metsän lisäksi rakennuksen, autoja, tietä ja muuta ympäröivää maastoa. PLS-keilauksella alueen kohteet mitattiin useasta eri suunnasta. Tutkimuksessa parannettuja PLS-koeaineistoja verrattiin TLS-keilaimella mitattuihin vertausaineistoihin. Aineistoista kerrotaan lisää luvussa 4. Tutkimuksen aineistot ja menetelmät.

Tutkimuskysymyksinä olivat: Miten PLS-aineistojen geometristä laatua voidaan parantaa ja mitkä ovat laserkeilausaineiston jälkikäsittelyn haasteet? Työn aihealueeseen eivät kuuluneet keilausaineistojen hankkiminen tai mittaukseen liittyvät laatutekijät. Mittaukseen liittyvät laatutekijät jätettiin tutkimuksen ulkopuolella, koska ne liittyivät esikäsittelyssä toteutettaviin vaiheisiin. Työ rajoittui pistepilvien georeferoinnin jälkeisiin jälkikäsittelyn toimenpiteisiin. Saatujen tulosten hyödyntäminen ei sisältynyt työhön.

### 1.3 Työn rakenne

Luvussa 2 kerrotaan laserkeilaimista yleisesti. Luku sisältää kuvaukset laserkeilainten toimintaperiaatteesta sekä erilaisista laserkeilaimista ja sovelluksista. Luvussa 3 perehdytään MLS-keilainten tarkkuuteen ja virhetekijöihin. Luvussa 4 kuvataan tutkimuksen tekemiseen käytetyt testiaineistot sekä tutkimuksessa käytetyt menetelmät ja niiden toteutus. Luvussa 5 esitellään tutkimuksen tulokset ja niiden tarkastelu. Luvussa 6 esitellään tutkimuksesta tehdyt johtopäätökset.

## 2. Laserkeilaimet

Tässä luvussa perehdytään laserkeilainten toimintaperiaatteisiin kappaleessa 2.1. Kappaleessa 2.2 esitellään erilaiset laserkeilaimet. Laserkeilain-tyyppejä ovat ilmalaserkeilain, maalaserkeilain sekä liikkuva laserkeilain eri alatyyppeineen. Henkilökohtaiset ja liikkuvat laserkeilaimet edustavat liikkuvan kartoituksen mittausjärjestelmiä. Kappaleessa 2.3 tarkastellaan laserkeilainten sovelluskohteita.

### 2.1 Laserkeilainten toimintaperiaate

Laserkeilainten (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, LASER) tarkoituksena on tallentaa kohteesta 3D-tietoa. Tätä laserkeilaimella mitattua 3D-aineistoa kutsutaan pistepilveksi. Pistepilvi koostuu yksittäisistä mitatuista pisteistä, joiden sijainti on tunnettu. Pisteen sijainti selvitetään mitatun kohteen ja keilaimen välisestä etäisyydestä ja mittaussäteen suunnasta. Etäisyys mitataan lasersäteen avulla. Keilainosa lähettää optiikalla suunnattua lasersädettä kohteen eri osiin halutulla tavalla. Ilmaisinosaa tallentaa vastaanotetun paluusignaalin ja määrittää kohteen pisteiden etäisyydet keilaimeen. Etäisyys määritetään esimerkiksi pulssin kulkuajan eli aikaeron (Time of Flight, TOF) tai vaiheeron (Phase Shift, PS) avulla. Myös säteen tulosuunta tallennetaan (Alho et al., 2011).

Laservalo on järjestäytynyt yhden aallonpituuden valo. Laserin aallonpituus vaihtelee tyypillisesti 500–1500 nm välillä (Lim, Mills ja Rosser, 2009). Se on koherentti eli valoaallot kulkevat samassa vaiheessa muiden valoaaltojen kanssa. Laservalo suunnataan tarkasti yhteen tiettyyn kohtaan (Heritage ja Large, 2009). Lasersäteen luoma piste ei ole silti yksittäinen piste, vaan ympyrän muotoinen kohde maastossa. Täysin ympyräksi se piirtyy vain kohteen ollessa kohtisuorassa sädettä vastaan oleva tasainen pinta. Laserkeilainta ajatellaan myös aktiivisena tutkana. Siitä käytetään myös lasertutka eli LiDAR (Light Detection and Ranging) nimitystä (Devereux ja Amable, 2009).

Keilaimessa on tyypillisesti peili- tai muu optinen järjestelmä, joka ohjaa säteen kulkua halutulla tavalla. Myös koko keilain voi olla pyörivä, jolloin mitataan laajempi alue. Erilaisia peilityyppejä ovat esimerkiksi heiluva (oskilloiva), pyörivä monikulmio (polygoni), vinopeili sekä kuituoptiikkaa (fiber scanner) käyttävät. Heiluva peili on suora levymäinen peili, joka muodostaa pienen mittauskulman. Polygonipeili ja vinopeili ovat pyöriviä peilejä. Polygonipeilissä on pyöriviä peilipintoja kolme tai enemmän. Vinopeilillä on laserin suunnan ja keilauskulman avulla mahdollista toteuttaa 360° keilauskulma. (Kukko, 2013, s. 28; Vosselman ja Maas, 2010, s. 17)

#### 2.1.1 Pulssilaserkeilain

Pulssilaserkeilain (Time of Flight, TOF) sopii paremmin laajojen alueiden mittaamiseen, kun taas vaihe-erolaserkeilaimet soveltuvat paremmin lähialueiden keilaamiseen (Holopainen, Hyypä ja Vastaranta, 2013, s. 30). Pulssilaserkeilaimissa lasersäteen kulkuaika kohteeseen ja takaisin keilaimeen tallennetaan. Pulssin kulkuajasta lasketaan valonnopeuden perusteella säteen kulkema matka (Kaava 1). Mitatun pisteen sijainti saadaan selville, kun säteen kulkema matka ja suunta tiedetään.

Pulssilaser soveltuu hyvin pitkien etäisyyksien mittaamiseen. Etäisyyden mittaamisessa seurataan myös laserin lähettämän pulssin vahvuutta ja toistotaajuutta (Pulse Repetition Frequency, PRF) (Cronvall, Kråknäs ja Turkka, 2012; Holopainen, Hyyppä ja Vastaranta, 2013, s. 17). Myös paluupulssin muoto tallennetaan aallonmuototekniikalla (Full-waveform) tyypillisesti noin 10–20 cm näytevälillä. Paluupulssin muodosta nähdään esimerkiksi puuston aiheuttama sironta tai irrotetaan sopivin detektorein etäisyyksiä erillisiin sirottajiin (Holopainen, Hyyppä ja Vastaranta, 2013, s. 21). Pulssilaserin pulssin kulkema matka  $r$  lasketaan seuraavalla kaavalla (Esim. Baltsavias, 1999):

$$r = \frac{dt \times c}{2}. \quad (1)$$

Kaavassa

$dt$  on säteen kulkema aika  
 $c$  on valonnopeus

### 2.1.2 Vaihe-erolaserkeilain

Vaihe-erolaserkeilain (Phase Shift, PS) lähettää signaalia. Ilmaisin laskee etäisyyden kohteeseen lähteneen ja saapuneen signaalin vaihe-eron avulla (Kaava 2). Matka  $r$  lasketaan vaihe-eromittauksista seuraavalla kaavalla (Esim. Wehr ja Lohr, 1999):

$$r = \frac{d\pi}{2\pi} * \lambda_0. \quad (2)$$

Kaavassa

$d\pi$  on vaihe-ero  
 $\lambda_0$  on lyhin erikseen määritelty aallonpituus

Vaihe-erolaserilla ei voida mitata yhtä kaukaisia kohteita kuin pulssilaserilla. Vaihe-erolaserilla saadaan kuitenkin samassa ajassa pulssilaseria tiheämpi aineisto. Vaihe-erolaser lähettää kohteeseen säteilyä jatkuvasti, kun pulssilaser vain pulsseittain. Pulssin pitää palata keilaimeen ennen seuraavan pulssin lähettämistä (Alho et al., 2011). Jotkut laserkeilaimet erottavat ja tallentavat jopa saman havainnon eri kaiut toisistaan (Cronvall, Kråknäs ja Turkka, 2012).

### 2.1.3 Radiometriset ominaisuudet

Myös mitattujen pisteiden intensiteettiarvo tallennetaan. Intensiteetti on paluukaiun voimakkuus (Holopainen, Hyyppä ja Vastaranta, 2013, s. 26). Intensiteettiarvo auttaa kohteen värin, heijastuvuuden ja muodon määrittelemisessä. Siihen vaikuttavat lisäksi kohteen sijainti, asento, tekstuuri ja valaistusolosuhteet (Bellian, Kerans ja Jennette, 2005). Voimakkaan kaiun palauttanut kohde heijastaa hyvin (Kaasalainen, Kukko ja Hyyppä, 2011).

Intensiteettiarvo on tyypillisesti ensimmäisen tai viimeisen kaiun arvo (Hyyppä ja Hyyppä, 2003). Keilainta lähimpänä oleva kaiku palaa ensimmäisenä takaisin lähettimeen (Holopainen, Hyyppä ja Vastaranta, 2013, s. 15). Eri valmistajat mittaavat intensiteetin erilaisilla menetelmillä, mikä vaikeuttaa eri mittaussaineistojen intensiteettiarvojen keskinäistä vertailua (Holopainen, Hyyppä ja Vastaranta, 2013, s. 19). Intensiteettiarvoja käytetään hyödyksi esimerkiksi puulajitulkinnassa (Holopainen, Hyyppä ja Vastaranta, 2013, s. 26).

Laserkeilaimissa on itse laserkeilaimen lisäksi tyypillisesti GNSS- ja Inertia-laitteet (Cronvall, Kråknäs ja Turkka, 2012). Niihin voidaan kiinnittää myös tallentava kamera. Eri laitteiden osien aineistot yhdistetään oikein toisiinsa aikaleiman avulla (Holopainen, Hyypä ja Vastaranta, 2013, s. 14).

## 2.2 Erilaiset laserkeilaimet

Erilaiset laserkeilaimet ovat ilmalaserkeilain (ALS), maalaserkeilain (TLS), liikkuva laserkeilain (MLS) sekä henkilökohtainen laserkeilain (PLS). Tässä laserkeilaimet ovat jaoteltu niiden alustan perusteella. Erilaiset laserkeilaimet voivat sisältää samoja osia, vaikka niiden käyttötavat ovat toisistaan poikkeavia. Esimerkkeinä voidaan mainita ajoneuvoalustainen liikkuva keilausjärjestelmä ja kannettava henkilökohtainen laserkeilain, jotka luokitellaan osaksi liikkuvaa kartoitusta.

### 2.2.1 Ilmalaserkeilain

Ilmalaserkeilainta (Airborne Laser Scanning, ALS) käytetään nimensä mukaisesti ilmasta käsin. ALS-keilainta käytetään niin lentokoneesta, helikopterista kuin avaruusaluksestakin. Avaruudesta käytettäviä keilaimia kutsutaan myös kaukokartoitus-laserkeilaimiksi. ALS-keilaimen mittausetäisyys on tyypillisesti sadoista metreistä muutamiin kilometreihin. Keilausalueen koko laajenee etäisyyden kasvaessa. Toisaalta samalla keilaimen tarkkuus heikkenee ja pulssin kulkuaikaan perustuvassa mittauksessa tuloksena saatavan pistepilven tiheys harvenee.

ALS-keilaimella lennetään tyypillisesti vierekkäisinä jonoina tai linjoina, joilla on hieman päällekkäisyyttä keskenään (Cronvall, Kråknäs ja Turkka, 2012). ALS-keilain mittaa tyypillisesti lähes kohtisuoraan alaspäin  $\pm 30^\circ$  avauskulmalla. ALS-keilaimet mittaavat tyypillisesti 800–1550 nm aallonpituusalueella (Vosselman ja Maas, 2010, s. 25). Pistetiheydestä saadaan tasainen, koska kohteet sijaitsevat kaikki suunnilleen samalla etäisyydellä laserkeilaimesta (Holopainen, Hyypä ja Vastaranta, 2013, s. 31). Kohteen pistejakaumaan vaikuttavat lentonopeuden- ja korkeuden lisäksi valittu keilaustapa.

ALS-keilauksen haittapuolena on sen kalleus. Hintansa lisäksi lentojen järjestely ja toteuttaminen vievät paljon aikaa (Kukko, 2005). Hyypä ja Hyypä (2003) ovat todenneet ALS-keilauksen olevan silti edullista ilmakuvakseen verrattuna. Lisäksi ALS-keilauksen hinnat ovat laskeneet ajan kuluessa. Holopainen, Hyypä ja Vastaranta (2013, s. 14) ovat arvioineet ALS-keilauksen maksavan koko Suomen kattavissa mittauksissa noin 15–30 euroa/km<sup>2</sup>. Pistetiheys eli pulssien lukumäärä olisi noin 0,5–1 pistettä/m<sup>2</sup>. Lisäksi laitteiston liikkeellelähtökustannukset olisivat noin 3000–6000 euroa (Holopainen, Hyypä ja Vastaranta, 2013, s. 14, s. 17). Kymmenen vuotta aiemmin Hyypä ja Hyypä (2003) arvioivat 100 km<sup>2</sup> kokoisten alueiden hehtaarihinnaksi noin 3–5 euroa usean pulssin pulssitiheydellä eli 300–500 €/km<sup>2</sup>.

### 2.2.2 Maalaserkeilain

Maalaserkeilain (Terrestrial Laser Scanning, TLS) tunnetaan myös nimillä terrestriaalinen laserkeilain, maastolaserkeilain (Holopainen, Hyypä ja Vastaranta, 2013, s. 30) sekä

maanpinnalla oleva LiDAR (ground-based LiDAR) (Liang, Hyyppä, Kukko, Kaartinen, Jaakkola ja Yu, 2014 b). TLS-keilain on tyypillisesti kolmijalalla seisova laserkeilain, joka tallentaa lähiympäristöään (Holopainen, Hyyppä ja Vastaranta, 2013, s. 30). TLS-keilaimessa on itse keilaimen lisäksi myös pakkokeskitysalusta, jalusta, virtalähde sekä tietokone tai keilaimen tallentava muisti. Tyypillisesti TLS-keilaimessa on mukana myös kamera. Kameraa hyödynnetään esimerkiksi pistepilven teksturoinnissa (Bellian, Kerans ja Jennette, 2005).

TLS-keilaimella mitataan MLS-keilainta pidempiä matkoja, mutta mittaustarkkuus on silti suunnilleen samaa luokkaa. TLS-keilaimesta on kehitetty teolliseen käyttöön soveltuvat laserkeilaimet, jotka mittaavat kohteita muutamien kymmenien senttimetrin päästä ja pääsevät myös mittaustarkkuudessa alle millimetrin tarkkuuteen (Cronvall, Kråknäs ja Turkka, 2012). TLS-keilaimen pistetiheys vaihtelee paljon (Holopainen, Hyyppä ja Vastaranta, 2013, s. 31). Keilain mittaa tyypillisesti tiheämpää pisteistöä läheltä itseään. Kaventamalla keilaimen kulmaa saadaan koko pisteistöä tihennettyä. Toisaalta keilainta pitää tällöin liikuttaa enemmän, jotta koko haluttu kohde saadaan mitattua (Cronvall, Kråknäs ja Turkka, 2012).

Holopainen, Hyyppä ja Vastaranta (2013, s. 30) mukaan vaihe-erolaserkeilaimella keilataan koko ympäristö 70–120 m säteeltä noin 2–4 minuutissa. Tällöin 10 m päästä saadaan pisteitä keskimäärin 6,3 mm etäisyydellä toisistaan eli noin 25 000 pistettä/m<sup>2</sup>. Heidän mukaansa TLS-keilaimella mitataan noin 10 metsän koealaa päivässä. Perinteisellä koealamittauksella päästään vain noin 3–5 metsän koealaa päivässä (Holopainen, Hyyppä ja Vastaranta, 2013, s. 30–31).

### 2.2.3 Liikkuva laserkeilain

Liikkuva laserkeilain (Mobile Laser Scanning, MLS) on nopeasti paikasta toiseen liikkuva tai liikuteltavissa oleva laserkeilain. Liikkuvaa laserkeilainta kutsutaan myös mobiililaserkeilaimeksi tai liikkuvaksi maalaserkeilaimeksi. MLS-keilain on esimerkiksi ajoneuvoon kiinnitetty laserkeilaimen, paikannusjärjestelmän ja kamerasen yhdistelmä (Kaartinen et al., 2012). Ajoneuvoon kiinnitetyllä laserkeilaimella tallennetaan esimerkiksi teiden ja rautateiden, erilaisten johtoverkoston ja siltojen rakenteita. Laserkeilain voidaan kiinnittää erilaisilla yhdistelmillä monenlaisiin alustoihin (Kukko, Kaartinen, Hyyppä ja Chen, 2012), esimerkiksi pieneen liikkuvaan veneeseen (Alho, Kukko, Hyyppä, Kaartinen, Hyyppä ja Jaakkola, 2009), lennokkiin (Jaakkola et al., 2010), hakkuukoneeseen tai ihmiseen (Esim. Holopainen et al., 2011; Liang et al., 2014 a).

Kukon (2009) mukaan liikkuva kartoitusjärjestelmä koostuu kolmesta osasta. Laite-osioon kuuluu GNSS-INS (Global Navigation Satellite System-Inertial Navigation System)-, keilain- ja kamerajärjestelmien lisäksi laitteiden synkronointi, integrointialusta sekä aineistojen tallennusjärjestelmä. Ohjelmistot-osioon kuuluvat GNSS-INS-aineistojen keruu ja laskeinta, georeferointi, aineistojen esikäsittely ja mallinnus sekä karttaprojektiot. Tukitoimintoina Kukko (2009) on maininnut järjestelmän ylläpidon, sensori- ja järjestelmäkallibroinnit, GNSS-tukiasemat, vertausaineistot sekä laadunarvioinnin.

MLS-keilaimessa yhdistyvät TLS- ja ALS-keilainten hyödyt. MLS-keilaimella tallennetaan kohteita, joita ALS-keilaimella ei saavuteta. MLS-keilaimen pistetiheys ja tarkkuus ovat ALS-keilaimen pistetiheyttä ja tarkkuutta parempia. MLS-keilaimella mittaaminen on

nopeampaa kuin TLS-keilaimella. Esimerkkinä voidaan mainita venelaserkeilain, jolla mitattiin viiden kilometrin pituisen joen ympäristö 1 tunnissa ja 40 minuutissa (Alho et al., 2011). MLS-keilaimella saadaan tyypillisesti TLS-keilainta tasaisempi pistejakauma (Holopainen, Hyyppä ja Vastaranta, 2013, s. 31). Toisaalta MLS-keilaimella ei voida mitata kohteita yhtä kaukaa kuin ALS-keilauksella.

MLS-keilainta käytetään myös TLS-keilaimen tavoin, kun keilausjärjestelmä pysäytetään välillä (Liang et al., 2014 a). Menetelmää kutsutaan Stop-and-go-malliksi (Holopainen, Hyyppä, Vastaranta, 2013, s. 30). Jatkuvalle keilauksella MLS-aineisto muistuttaa ALS-aineistoa. Jatkuvalle keilauksella tuotettu aineisto on laajemmalla alueella, mutta pistetiheydeltään harvempi (Liang et al., 2014 a).

MLS-keilaimia on rakennettu erilaisin yhdistelmin. Kaartinen (2013, s. 29) mainitsee muun muassa RIEGL Laser Measurement System GmbH:n RIEGL VMX-250-keilaimen, Geodeettisen laitoksen tutkimuskäyttöön kehittämän Sensei-keilaimen ja TerraTec AS:n Optech Lynx -keilaimen. Kukko (2013, s. 27 ja s. 103) mainitsee lisäksi GEOMOBILin, GeoMasterin, StreetMapper360:n, venelaserkeilain BoMMS:n, kärrylaserkeilain CartMMS:n sekä Kaartinen, Hyyppä, Kukko, Jaakkola ja Hyyppä (2012) mainitsevat RIEGL VMX-450:n.

Muita tunnettuja laserkeilaimia ovat esimerkiksi Jacobsin yliopistolla kehitetty Itävallan tiedeakatemian (Austrian Academy of Sciences, Institute for the Study of Ancient Culture) sekä the Soprintendenza Speciale per i Beni Archeologici di Roma – Sede di Ostian kanssa toteutettu MLS-robotti Irma3D (Intelligent Robot for Mapping Applications in 3D) (Jacobs University, 2012), joka kiinnitetään selkään selkärepun tapaan. Irma3D-selkäreppujärjestelmässä ei ole vielä IMU:a käytössä (Elseberg, Borrmann ja Nüchter, 2013). Geodeettisella laituksella tutkimuskäyttöön kehitetyistä MLS-keilaimista Roamerista ja Akhkasta IMU löytyy jo (Kaasalainen, Kukko ja Hyyppä, 2011). Roamer tuottaa 122 000–976 000 3D-pistettä sekunnissa (Kukko, 2013, s. 71). Samaan aikaan kaupallinen RIEGL-yrityksen VMX-250 pystyy tyypillisesti 300 000 pisteeseen sekunnissa (Kaartinen et al., 2012) ja VMX-450 taas 550 000 pisteeseen sekunnissa (RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2014).

Pienen UAV-lennokin (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) ajatellaan kuuluvan lentokoneen ja MLS-keilaimen väliin. UAV-lennokilla keilataan ilmasta lentokoneen tavoin. Toisaalta UAV-lennokki pääsee liikkumaan nopeasti eri paikkoihin, kuten MLS-keilain. UAV-lennokilla kuvataan aineistoa ylhäältäpäin myös paikoista, joihin lentokoneella ei pääse, esimerkiksi metsän sisältä. Lentokone on myös kallis menetelmä etenkin pienille alueille, vaikkapa moniaikaiseen seurantatutkimukseen (Jaakkola et al., 2010). UAV-lennokki ei tarvitse lentotaitoista ohjaajaa lentokoneen tavoin, vaan sitä kauko-ohjataan maasta käsin. UAV-lennokin tasainen ohjaus vaatii myös harjaannusta.

Jaakkola et al. (2010) esittelemä UAV-lennokin laitteisto (FGI Sensei) on käytettävissä, vaikka autossa MLS-keilaimena. UAV-lennokki sisältää GPS-IMU-järjestelmän, tietokoneen ja kahden laserkeilaimen lisäksi tarvittaessa CCD- ja lämpökamerat sekä spektrometrit. Kameran värikuvat auttavat pisteiden luokittelussa (Jaakkola et al., 2010). MLS-keilaimessa pitää huomioida myös laitteen paino. Painoa tulee erillisten laitteistojen lisäksi esimerkiksi kaapeleista, akuista ja erilaisista tukirakenteista. Suurten laitteiden kanssa haasteeksi tulee myös mahdolliset lakien asettamat painorajoitukset ilma-aluksille (Jaakkola et al., 2010).



Jaakkola et al. (2010) vertailevat ALS-keilainta ja autolla liikkuvaa laserkeilainta (CLS). MLS-keilaimella päästiin tyypillisesti 100–1000 pisteen tiheyteen m<sup>2</sup>:llä, kun lentokoneella saman alueen tyypillinen pistetiheys oli vain 0,5–40 pistettä. Tutkimuksessaan Jaakkola et al. (2010) pääsivät UAV:lla jopa 100–1500 pistetiheyteen m<sup>2</sup>:llä. Myös tarkkuus oli tyypillisesti MLS-keilaimella (jopa 2–10 cm) ALS-keilaimen tarkkuutta (korkeudessa 5–30 cm) parempi (Jaakkola et al., 2010).

#### 2.2.4 Henkilökohtainen laserkeilain

Henkilökohtaisen laserkeilaimen (Personal Laser Scanning, PLS) etuna on muita laserkeilaimia parempi liikkuvuus erilaisissa maastoissa (Kukko, 2013; Liang et al., 2014 a). PLS-keilain on MLS-keilainta riippumattomampi maasto-olosuhteista ja TLS-keilainta nopeampi siirtää paikasta toiseen (Liang et al., 2014 a). PLS-keilaimella tallennetaan kohde monista eri suunnista. Näin pistepilvi on myös tasaisemmin jakautunut. PLS-keilaimen käyttäjä voi halutessaan paikan päällä mitata helposti lisää alueita (Liang et al., 2014 a). PLS-keilausjärjestelmä käännetään myös ylösalaisin esimerkiksi maanpinnan kartoitusta varten. Laitteiden keskinäinen sijainti pysyy PLS-keilaimessa samana, mikä vähentää kalibrointitarpeita (Liang et al., 2014 a).

Tunnetuin PLS-keilain on Geodeettisella laitoksella puuaineistojen keräämiseen kehitetty Akhka R2. Se on ammattilaistasoinen laitteisto. Liikkuvan selkäreppulaserkeilaimen ensimmäinen prototyyppi painoi noin 30 kg eli se oli suurikokoinen (Liang et al., 2014 a). Uudempi järjestelmä on saatu kevyemmäksi laitteistojen kehittyessä. PLS-keilaimen paino on noin 22 kg (Liang et al., 2014 a).

PLS-keilain on ennen kaikkea nopea. Liang et al. (2014 a) saivat keilattua 2000 m<sup>2</sup>:n testi-alueensa kahdessa minuutissa. Joka sekunnissa tallennettiin noin miljoona pistettä. Heidän tavoitteenaan on saada PLS-keilaimelle vielä korkeampi keilaustaajuus ja tehdä siitä aiempaa kevyempi (Liang et al., 2014 a).

### 2.3 Laserkeilainten sovellukset

Laserkeilaimia käytetään lukuisiin erilaisiin käyttötarkoituksiin. Kaikkien laserkeilainten tärkein sovelluskohde on luoda 3D-malli mitattavasta kohteesta. Laserkeilaimella on mahdollista mitata myös öisin. Vilhomaan (2010, s. 31) mukaan laserkeilausta haittaavat pilvet, sade, usva, maan paksu lumikerros ja tulvavedet.

Tarkkoja TLS-keilaimia hyödynnetään esimerkiksi lääketieteessä hampaiden ja tekonivelten mallinnuksessa, arkeologiassa (Chrutchley, 2009) sekä teollisuudessa laadunvalvontaan. Suurempia keilaimia käytetään niin kaupunkien, maaston (Overton et al., 2009), metsien, peltojen, ikeroudan, lumisuuden, (arvo)rakennusten, louhosten, sähkölaitteiden ja -linjojen, siltojen, tunneleiden, laivojen, rautateiden, kallioseinämien kuin teidenkin tallentamiseen ja muutostulkintaan. Laserkeilauksen sovelluksia ovat myös lentoestekartat, onnettomuus-, rikospaikka- ja katastrofitulkinnat, tulva- ja maanvyörymämallit (Overton et al., 2009), turvallisuusselvitykset, erilaisten sisätilojen ja historiallisesti merkittävien kohteiden, kuten patsaiden ja taulujen, rakenteiden ja laitteiden osien, kasvojen ja ihmisten mallinnukset. (Esim. Wehr ja Lohr, 1999; Matikainen et al., 2011; Cronvall, Kråknäs ja Turkka, 2012; Kukko, 2013)

Laserkeilaimia käytetään myös monissa yksittäisissä erikoistapauksissa. Tällaisia ovat esimerkiksi Pesosen (2011) esittelemä lahopuiden ennustaminen ja tunnistaminen, Wehrin ja Lohrin (1999) mainitsevat peli- ja elokuvasovellukset tai Geodeettisen laitoksen Espoon Tapiolan kaupunginosasta toteutettu 3D-sovellus (Kukko et al., 2012). Liang et al. (2014 a) ehdottavat, että PLS-järjestelmää voisi käyttää metsän harvennuksen suunnitteluun, metsän ekosysteemin kartoitukseen, lehti-indeksien määrittämiseen, metsäpolkujen tallentamiseen ja visualisointiin, esimerkiksi virkistys- ja retkeilykäyttöön sekä marjan ja sienten poimijoiden iloksi.

Laserkeilaus on hyvä menetelmä myös muihin menetelmiin verrattuna. Laserkeilauksella toteutettiin esimerkiksi vuonna 2005 aloitettu Suomen korkeusmallin teko. Vaihtoehtoisina menetelminä olivat laserkeilauksen lisäksi fotogrammetriset menetelmät ja SAR-interferometria. Vilhomaa (2010, s. 28) perustelee laserkeilauksen valintaa Suomen maasto-olosuhteilla, laserkeilausaineiston laadulla, edullisilla kustannuksilla ja tehokkuudella. Laserkeilausta on hyödynnetty tähän tarkoitukseen jo 1990-luvun alusta. Kehitystä on tapahtunut etenkin ohjelmistojen ja keilaimien saralla (Vilhomaa, 2010, s. 28).

### 3. Liikkuvien laserkeilainten tarkkuus ja virhetekijät

Tässä luvussa tarkastellaan liikkuvan laserkeilaimen tarkkuutta ja erilaisia virhetekijöitä. Ensimmäisessä kappaleessa 3.1 esitellään MLS-keilainten paikannusta. MLS-keilainten paikannukseen vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi GNSS, IMU ja trajektori. Toisessa kappaleessa 3.2 esitellään aineistoon liittyviä näkökohtia. Kolmannessa kappaleessa 3.3 tarkastellaan laitteille ominaisia virheitä. Neljännessä kappaleessa 3.4 kuvataan muita virhetekijöitä.

#### 3.1 Liikkuvien laserkeilainten paikannus

Liikkuvien laserkeilainten paikannuksessa hyödynnetään tyypillisesti ulkotiloissa suora-paikannusjärjestelmää eli GNSS:n (satelliittipaikannus) ja IMU:n (inertia) yhdistelmää (Kukko ja Jaakkola, 2011). Yhdistelmää kutsutaan myös suoran orientoinnin sensoreiksi. Niillä selvitetään keilaimen sijainnit ja kallistukset (Rönholm ja Hyypä, 2011). Paikannushavainnoista lasketaan kuljettu reitti eli trajektori suoraan reaaliaikaisesti tai jälkikas-kentaprosessina. Alho et al. (2011) mukaan tarkan reitin selvittämiseksi riittää mittauspis-teen lähellä oleva GNSS-tukiasema tai VRS-palvelun (Virtual Reference Station) tuottama tukiasema. Yksittäinen tukiasema kattaa noin 30 km säteisen alueen tarkkuudella 10 cm (Hyypä ja Hyypä, 2003).

Paikannuksen tarkkuus on tärkeää, jotta laserilla mitatut pisteet saadaan niiden todellisiin sijainteihin (Kaava 3). Pisteiden mittaajankohda on yhdistetty paikannusjärjestelmään (Kukko ja Jaakkola, 2011). GNSS ja IMU antavat joskus havaintoja eri taajuuksilla. Täl-löin toisen laitteen arvot interpoloidaan. Kukko (2013, s. 33) mukaan MLS-keilainten pai-kannusmenetelmien tarkoituksena on kertoa sen hetkisen sijainnin lisäksi suhde haluttuun koordinaatistoon sekä epookki.

Vilhomaa (2010, s. 29) esittää yksittäisen pisteen sijainnin yleiseen ratkaisemiseen seuraav-laista kaavaa:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_G = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} + R_{IMU} R_{LRF}^{IMU} R_M \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ l \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Kaavassa

$(X, Y, Z)_G$  ovat kohdepisteen maastokoordinaatit

$(X_0, Y_0, Z_0)$  on laserkeilaimen sijainti

$R_{IMU}$  on IMU:n kiertomatriisi

$R_{LRF}^{IMU}$  on IMU:n ja keilaimen koordinaatistojen välinen kiertomatriisi

$R_M$  on laserkeilaimen peilin kiertomatriisi eli keilauskulma

$l$  on laseretäisyys

##### 3.1.1 GNSS

GNSS (Global Navigation Satellite System) on satelliittipaikannusjärjestelmä. Liikkuvan kartoitusjärjestelmän keilaimen sijainti selvitetään satelliittivastaanottimen havaitsemien satelliittietäisyyshavaintojen perusteella. Tunnettuja satelliittipaikannusjärjestelmiä ovat esimerkiksi GPS (The Global Positioning System) tai GLONASS (Kukko, 2013, s. 33).

Liikkuvan kartoitusjärjestelmän GNSS-vastaanottimen täytyy saada havaintoja satelliiteista, jotta etäisyys satelliitteihin saadaan selville. Etäisyydestä lasketaan keilaimen oma sijainti.

Etäisyyden laskemiseen käytetään joko absoluuttista, differentiaalista tai suhteellista paikanmäärittystä. Absoluuttinen paikanmäärittys tarkoittaa satelliitin lähettämän signaalin vastaanottamista. Signaalin kulku-aika satelliitista vastaanottimeen selvitetään koodihavaintojen avulla. Kulkuajasta lasketaan etäisyys satelliittiin. Vastaanottimen sijainti selvitetään etäisyyden ja satelliitin tunnetun paikan avulla (Wells et al., 1986). Differentiaalisessa paikanmäärittämisessä käytetään apuna differentiaalikorjausta (Poutanen, 1998, s. 202–204). Vastaanotin saa tunnetussa paikassa sijaitsevan vertausvastaanottimen avulla määritetyn sijaintikorjauksen tietoonsa esimerkiksi radion tai matkapuhelimen avulla. Differentiaalikorjaus parantaa paikannustarkkuutta.

Suhteellisessa paikanmäärittämisessä hyödynnetään signaalien kantoaaltoja. Suhteelliseen paikanmäärittämiseen tarvitaan keilaimen vastaanottimen lisäksi toinen vastaanotin, jonka sijainti on tunnettu. Näiden vastaanottimien välinen koordinaattiero selvitetään. Vastaanotin määrittää satelliitin lähettämien tietyn ajanhetken jälkeisten aallonpituuksien lukumäärän. Muutamien satelliitin aallonpituuksien avulla selvitetään vastaanottimen etäisyys satelliittiin (Wells et al., 1986). RTK-mittaus (Real Time Kinematic) on yksi suhteellisen paikanmäärittämisen sovelluksista (Bilker ja Kaartinen, 2001, s. 2).

Kun satelliittinäkyvyys ja -geometria ovat riittäviä, niin vastaanottimet saavat 1–10 havaintoa sekunnissa. Vähintään neljän satelliitin tulisi olla näkyvillä, jotta saadaan hyvä paikannustarkkuus. Tällöin paikannustarkkuus on muutamien senttimetrin luokkaa. Huonolla satelliittinäkyvyydellä ja -geometrialla paikannus katoaa kokonaan. Huonoimmillaan satelliittinäkyvyys on esimerkiksi kasvillisuuden alla metsissä tai kaupungeissa. Siksi MLS-keilainten käyttöön tarvitaan myös IMU-laitteita (Kukko, 2013, s. 3). IMU pystyy pitämään tarkkaa paikannusta yllä jonkin aikaa, vaikka GNSS:ää olisi mahdotonta käyttää. IMU:n paikannustarkkuus heikkenee kuitenkin kohtuullisen nopeasti, jos se ei saa tarkistettua sijaintiaan satelliittipaikannuksen avulla (Kukko ja Jaakkola, 2011).

### 3.1.2 IMU

IMU (Inertial Measurement Unit) tarkoittaa inertiaalimittausyksikköä. IMU on inertiaalijärjestelmä, jossa on 6-ulotteinen mittausjärjestelmä eli se mittaa asennon lisäksi paikkaa (King, 1998). IMU:n paikannus perustuu lineaariseen kiihtyvyyteen, kulmien muutokseen ja suunta-akselien kiertoihin. IMU:n paikannustarkkuus kestää vain hetken. IMU:n ratkaisun virheet jatkuvat gyrokoopin ja kiihtyvyyssanturin virheisiin. GNSS kompensoi vastaavasti IMU:n virheitä. (King, 1998; Kukko, 2013, s. 33)

INS (Inertial Navigation System) on osa IMU-järjestelmää. INS käyttää Kukon (2013, s. 35) mukaan paikannukseen tietokoneen lisäksi liike- ja kiertosensoreita. Näiden avulla INS saa selville paikan ja suunnan lisäksi liikkumisnopeuden. Vaaja (2012) mukaan inertiaalimittauksen vajeaksi jättämiä paikannustietoja täydennetään tunnettujen pisteiden tai kohteiden avulla. Näin myös sisätiloissa on toteutettu lyhyitä mittauksia.

### 3.1.3 Trajektori

MLS-keilaimen kulkemaa reittiä kutsutaan trajektoriksi. Trajektori lasketaan paikannuslaitteiston havainnoista. Trajektorin laskeminen tehdään reaaliaikaisesti tai jälkilaskentaprosessina. Trajektorin oikeellisuus on suoraan riippuvainen paikkatietohavaintojen virheettömyydestä. Trajektori kertoo kullakin ajanhetkellä MLS-keilaimen sijainnin suhteessa maastokoordinaatteihin. Mitattujen pisteiden todelliset sijainnit selvitetään niiden mittausuunnista ja etäisyyksistä keilaimeen. Trajektorin virheet heijastuvat siis suoraan pisteiden sijaintivirheisiin eli geometriseen tarkkuuteen. Trajektoriratkaisu siirretään tyypillisesti suoraan mittausensorin koordinaattijärjestelmän origoon, jolloin trajektoriratkaisu sijaitsee luonnollisesti keilauskorkeudella. Trajektori sisältää tyypillisesti tiedot järjestelmän paikasta ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), asennosta (roll, pitch, heading) ja nopeudesta ( $v_x$ ,  $v_y$ ,  $v_z$ ) tietyllä ajanhetkellä.

### 3.1.4 Paikannusmenetelmien tarkkuudet

Kukko (2013, s. 74) on tutkinut GPS-IMU-yhdistelmien paikannustarkkuutta. Hän ajoi autolla Roamer-laserkeilainjärjestelmän kanssa reittiä, jossa satelliittien näkyvyys vaihteli. Vertailtavina menetelminä oli pelkkä GPS:n käyttö, tukiaseman kautta RTK-ratkaistu GPS ja GPS-IMU-yhdistelmä. Pelkällä GPS:llä sijainti pystyttiin selvittämään 82,6 % matkalta. Menetelmä oli hyvä RTK:lla saatuun 60,4 % verrattuna. Paras ratkaisu oli GPS-IMU-yhdistelmän 100 %. IMU:n ja GNSS:n yhdistäminen lasketaan tyypillisesti esimerkiksi Kalman-suotimella (Kalman, 1960). Kalman-suodin antaa paikannusratkaisulle paremman ja luotettavamman tuloksen. GNSS- ja IMU-järjestelmät toimivat hyvin yhdessä, koska niiden virheet ovat erilaisia ja toisistaan riippumattomia. (Kukko, 2013, s. 34)

Rönholm ja Hyyppä (2011) mukaan GNSS- ja inertiamittausjärjestelmä-yhdistelmän sijaintivirheeksi 5–10 cm,  $\omega$ - ja  $\phi$ -kierroille alle  $0,006^\circ$  sekä  $\kappa$ -kierrolle alle  $0,01^\circ$ . Suoran orientoinnin kokonaisuuksissa ei ole käytännössä omaa laadunvalvontajärjestelmää. Satunnaiset tai säännölliset virheet tunnistetaan ja korjataan vasta jälkilaskennassa (Rönholm ja Hyyppä, 2011).

GNSS-vastaanotin tallentaa PLS-keilaimen lähettämät aikasisignaalit sekä keilaimen sijainnin tyypillisesti 1 Hz taajuudella. IMU taas tallentaa kiihtyvyyksiä 200 Hz taajuudella. GNSS- ja IMU-havainnot yhdistetään aineiston jälkikäsitteilyssä GNSS-tukiasema-aineistoon. Maaston tai PLS-keilaimen käyttäjän nopeat muutokset tai liikkeet lisäävät paikannusvirhettä. (Liang et al., 2014 a)

Satelliittipaikannuksessa itsessään on virheitä. Esimerkkinä voidaan mainita RTK-mittaus, johon ilmakehä aiheuttaa eniten virhettä (Tötterström, 2000). Ilmakehä vaikuttaa signaalin kulkunopeuteen. Kulkunopeuden vääristymä johtaa väärään etäisyydestietoon. Muina virhelähteinä Poutanen (1998, s. 122) mainitsee satelliittiratojen sekä -kellojen ja vastaanotinten virheet sekä monitieheijastukset. Monitieheijastuksilla tarkoitetaan sitä, että satelliitin lähettämä signaali heijastuu jostakin muusta kohteesta ennen varsinaiseen vastaanottoimeen osumista (Heritage ja Large, 2009). Poutanen (1998, s. 199) antaa absoluuttisen paikannäärityksen paikannuksen tarkkuuden arvioksi paremman kuin muutama metri. Paras, jopa muutaman senttimetrin paikannustarkkuus saavutetaan suhteellisella RTK-

paikanmäärittelyksellä (Bilker ja Kaartinen, 2001, s. 23) ja differentiaalisella paikannuksella (Kukko, 2013, s. 33).

Hyvällä GNSS-näkyvyydellä pystytään tuottamaan hyvää MLS-aineistoa (Kaartinen, 2013, s. 37). Kukon (2013, s. 35) mukaan useammat eri GNSS-satelliittipaikannusjärjestelmät tarjoavat tulevaisuudessa paremman tarkkuuden. Etenkin eri paikannusjärjestelmien yhdistelmillä (GPS, GLONASS) signaali löytyy todennäköisesti helpommin silloinkin, kun yksi järjestelmä on hukassa.

Huono paikannustarkkuus aiheuttaa suoraan virhettä trajektoriin. GNSS:n ja IMU:n aiheuttamat virheet kompensoidaan esimerkiksi nauhamaisilla oikaisuille. Kyseistä menetelmää löytyy valmiina jo olemassa olevista ohjelmista (Kaartinen, 2013, s. 39 ja s. 45). Kaartisen (2013, s. 45) mukaan etenkin hankalissa olosuhteissa mitatun aineiston trajektorin korjausta pitäisi kehittää. Parempia ratkaisuja tulisi olla sekä laitteisto- että laskentapuolella (Kaartinen, 2013, s. 45).

## 3.2 MLS-pistepilvien laatu

Kartoitustehtäviin käytettävän pistepilviaineiston tarkkuutta tulee arvioida, jotta tiedetään miten hyvin aineisto soveltuu käyttöön. Geometrinen laatu on yksi aineiston luotettavuuden mittareista. Honkavaara (2003) on tarkastellut geometrista laatua digitaalisten kuvien näkökulmasta. Honkavaaran (2003) mukaan geometrinen laatu tarkoittaa kohteiden sijainnin tarkkuutta kuvilla. Laserkeilauksessa geometrinen laatu toimii vastaavalla tavalla. Geometrinen laatu kertoo kuinka tarkasti mitattu piste sijaitsee oikeassa paikassa pistepilvessä. Honkavaaran (2003) mukaan myös käytetyt koordinaatit ja niiden muunnokset vaikuttavat geometriseen laatuun.

Heikolla GNSS-näkyvyydellä on trajektorin sijaintitarkkuuden lisäksi vaikutusta PLS-keilaimen heading-kiertokulmaan (Liang et al., 2014 a). Liang et al. (2014 a) mukaan  $0,05^\circ$  virhe kiertokulmassa johtaa 25 m keilausetaisyysdellä 2 cm sijaintivirheeseen pisteessä. Tämä pistevirhe heijastuu suoraan PLS-keilaimen pistepilveen, koska aineiston georeferointi tehdään GNSS-tietojen perusteella (Liang et al., 2014 a). Tällöin PLS-keilaimen pistepilven tarkkuus on TLS-keilaimen pistepilveä huonompi (Liang et al., 2014 a). Kukko (2013, s. 26–27) toteaa, että MLS-keilaimella pitäisi pystyä mittaamaan normaalilla ajonopeudella kymmenien metrien päähän parin senttimetrin tarkkuudella. Liang et al. (2014 a) havaitsivat PLS-aineiston ja -virheiden ominaisuuksien olevan erilaisia kuin esimerkiksi TLS-keilaimen. TLS-aineistoissa käytettäviä menetelmiä ei voida siis suoraan käyttää PLS-aineistoissa.

### 3.2.1 Virheet pistepilvessä

Kaikki erilaiset keilauksen ja prosessoinnin aikana syntyvät virheet kumuloituvat lopputuotteeseen. Liikkuvan laserkeilauksen lopputulos on pistepilvi, johon kasautuvat kaikki aiempien työvaiheiden virheet. Pistepilvissä olevat virheet ovat monien eri tekijöiden summa. Silti keilauksen laatua mitataan tyypillisesti juuri lopputuloksen eli pistepilven perusteella.

Tiheämpi pistepilvi antaa kohteesta enemmän tietoa, jolloin kohteen yksittäisten muotojen ja piirteiden tunnistaminen on helpompaa. Toisaalta tiheästäkin pistepilvestä ei ole hyötyä, jos pisteiden sijaintitarkkuus on huono (Cronvall, Kråknäs ja Turkka, 2012). Pistepilvessä voi olla myös aukkoja tai turhaa tietoa. Pistepilven ylimääräiset tai väärät pisteet on hyvä poistaa (Cronvall, Kråknäs ja Turkka, 2012). Virheellisiä pisteitä aiheuttavat niin linnut, pilvet kuin ilmassa olevat hiukkasetkin.

Toisinaan myös maakaikujen jälkeen tulee virheellisiä jälkikaikuja (ringing) maanpinnan alapuolelle tai monitieheijastuksia. Monitieheijastukset pidentävät säteen kulkuaikaa, jolloin mitatusta etäisyydestä tulee väärä (Heritage ja Large, 2009). Pistepilveen muodostunut kohinaa poistetaan intensiteettiarvojen tai suotimien avulla. Liang et al. (2014 a) mukaan matalan intensiteettiarvon pisteillä on tyypillisesti huonompi tarkkuus. Kohinapisteet johtuvat tyypillisesti heikosta paluusignaalista tai useista saman kohdan paluusignaaleista (Liang et al., 2014 a).

Pistepilvien sisältämiin kohteisiin tulee virheitä monista eri syistä. Esimerkkinä voidaan mainita okkluusio. Okkluusio tarkoittaa tilannetta, jolloin kappale peittää toisen kappaleen ainakin osittain (Liang et al., 2014 a). Tällöin kohde jää osittain puuttumaan pistepilvestä. Liang et al. (2014 a) toteavat kohteiden jäävän jopa kokonaan keilaamatta. Toisinaan kohde keilataan, mutta sitä ei saada tallennettua aineistoon. Kohde voi jäädä myös tunnistamatta aineistosta, se tulkitaan väärin tai se sijoittuu väärään kohtaan (Holopainen, Hyyppä ja Vastaranta, 2013, s. 28).

Jotkut mitattavat materiaalit aiheuttavat virhettä riippuen niiden pinnan takaisinsironnan voimakkuudesta. Tällöin kohteen sijainnille, tyypillisesti virheellisen etäisyyksimittauksen takia, tulee väärä tieto kohteen omien ominaisuuksien vuoksi. Esimerkkinä voidaan mainita vaaleat ja tummat tai rosoiset pinnat, joilla on vaikutusta etäisyyksimittauksen tarkkuuteen. On mahdollista, että vain osa mitattavasta kohteesta tulee havaittua tämän vuoksi. Myös maaston muodot, esimerkiksi mäet aiheuttavat virhettä. (Hyyppä ja Hyyppä, 2003)

### 3.2.2 Aineistojen yhdistäminen ja muut laskennan virhetekijät

Pistepilvien yhdistämistä kutsutaan rekisteröinniksi (Cronvall, Kråknäs ja Turkka, 2012). Pistepilvet yhdistetään siten että kohteiden ja pistepilvien keskinäiset suhteet säilyvät oikeina. Aineistojen yhdistäminen tehdään piste- tai objektitasolla. Pistetason yhdistämisessä muodostetaan yksi pistepilvi, jolle tehdään jatkoprosessointi. Objektitason yhdistämisessä eri keilaukset prosessoidaan ensin erikseen ja sitten vasta yhdistetään toisiinsa. Iteratiivinen lähimmän pisteen menetelmä (Iterative Closest Point, ICP) on yksi rekisteröinnissä käytettävistä menetelmistä.

Pistepilvien yhdistämisessä hyödynnetään myös esimerkiksi tunnettuja kohteita tai sijainteja sekä tähyksiä. Tähysten käyttö on Joalan (2003) mukaan yhdistämismenetelmistä tärkein. Jokaisesta pistepilvestä pitäisi löytyä vähintään kolme yhteistä tähyä. Tähysten keskipisteet mitataan keilauksen aikana, jotta niiden keskipisteet voidaan määrittää yhdistämisen aikana. Menetelmällä päästään Joalan (2003) mukaan jopa 1–3 mm tarkkuuteen TLS-keilaimilla. MLS-aineiston yhdistäminen toiseen laserkeilausaineistoon on haastavaa keilausgeometrian ja huonon satelliittinäkyvyyden takia (Liang et al., 2014 a). MLS-keilauksessa ei myöskään aina käytetä tähyksiä TLS-keilauksen tavoin.

Georeferointi tarkoittaa aineiston sitomista tunnettuun koordinaatistoon (Cronvall, Kråknäs ja Turkka, 2012). Georeferointia käytetään rekisteröinnissä. Jos keilausaineistojen yhdistämisessä käytetään apuna erikseen mitattuja GPS-pisteitä, virheellisistä GPS-mittauksista tulee haittaa myös aineistojen sijainteihin (Närhi et al., 2008). Aineistoille voidaan etsiä myös oma yhteinen koordinaatisto ulkoisen koordinaatiston sijaan.

Rekisteröinnin yhdistämistä analysoidaan esimerkiksi vertailemalla aineistoja valmiisiin malleihin tai referenssipisteisiin. Vertailuissa täytyy huomioida vertailuaineistojen tarkkuudet. Kohteiden tunnettuja ominaisuuksia, kuten pituuksia tai pinta-aloja käytetään myös vertailun tukena (Hyypä ja Hyypä, 2003). Käsillä tehdyt pienemmät yksittäiset mittaukset eivät ole kustannustehokkaita tai tarkkoja menetelmiä. Virheitä verrataan aiempien menetelmien tai aineistojen tuottamiin tuloksiin suoraan, esimerkiksi erilaiset tilastolliset menetelmät ovat suosittuja. Rekisteröinnissä pitää olla huolellinen, koska virheellisten pistepilvien yhdistäminen tekee koko aineistosta virheellisen. Aineistoja ei tulisi yhdistää toisiinsa ennen systemaattisen virheen poistoa (Hyypä ja Hyypä, 2003). Aineistojen yhteensovitus on harvoin täysin virheetöntä käytetystä menetelmästä riippumatta. (Hyypä ja Hyypä, 2003)

### 3.3 Laitteiden virheet

Mittaukseen vaikuttavat myös käytettävät laitteet ja niistä aiheutuvat virheet. Erilaisilla laserkeilaimilla on omanlaisia virheitään. MLS-keilaimen alusta voi liikkua metsäympäristössä voimakkaastikin. Maasto voi olla hankalaa myös suuremmille ajoneuvoille. Esimerkkinä voidaan mainita mönkijä (All-Terrain Vehicle, ATV), jota on hyödynnetty haastavammissa metsäolosuhteissa (Liang et al., 2014 a). ALS-keilauksessa käytetyt lentokoneet ovat kohtuullisen vakaita laitteita. Silti niiden liikehännästä tulee virheitä, puhumattakaan helikoptereiden ja vastaavien käyttämisestä. Tuulinen sää vaikuttaa lentokoneiden kulkuun (Hyypä ja Hyypä, 2003). TLS-keilainta liikutellaan, mutta toisaalta yksittäisen mittauksen aikana se on paikallaan.

#### 3.3.1 Laitteiden kalibrointi

Kalibrointi tarkoittaa laitteiden mittauspoikkeamien etsintää. Löydettyjen systemaattisten virheiden avulla laitteilla saatuja mittauksia voidaan korjata. Tyypillisesti kalibrointi on hyvä tehdä ennen laitteen käyttöä, jotta aineiston virheet voidaan korjata mittauksen aikana tai heti niiden jälkeen. Toisaalta joskus virheet on mahdollista havaita vasta mittauksen jälkeen. Kalibroinnilla ei voida poistaa satunnaisia virheitä. Satunnaiset virheet voidaan korjata esimerkiksi toistomittauksen tai havaintojen keskiarvojen avulla. Kalibrointi on tärkeä muistaa aina, jotta aineistoja voidaan käyttää ja mahdollisesti verrata myös muihin aineistoihin. Huonosti tehty kalibrointi aiheuttaa laajemman virheen koko aineistossa (Kaartinen H., 2013, s. 45).

Laserkeilaimen kulmatarkkuus kuvaa, kuinka tarkka lasersäteen suunnanmääritys on. Huono kulmatarkkuus aiheuttaa etäisyysvirheen lisäksi pisteeseen sijaintivirheen (Kukko, 2005). Kaartinen (2013, s. 39) tutki keilainten kalibrointitarkkuuksia liikkuvalla Roamer-laserkeilaimella. Roamer kalibroitiin ensin laboratoriokalibroinnilla. Vertailuaineistoa varten Roamer kalibroitiin myös kenttäkalibroinnin avulla. X-akselin suuntainen kiertovirhe (roll error) havaitaan Kukon (2009) mukaan erikseen mitattujen korkeusmallien



avulla. Muiden suuntien kiertovirheet havaitaan kohtisuorista kohteista esimerkiksi rakennusten kulmista (Kaartinen, 2013, s. 39). Kalibroinnin kiertokulmat selvitetään vertausaineistojen avulla. Kiertokulmia verrataan aineistojen vaaka- ja pystysuoriin kohteisiin (Jaakkola et al., 2010).

GNSS- ja IMU-sensorit kannattaa sijoittaa yhteiseen alustaan. Laitteiden tasaus ja sijoittelu tulee tehdä huolellisesti, jotta laitteiden keskinäinen sijainti säilyisi samana laitteen liikkuessa (Kukko, 2009; Kukko, 2013; Kaartinen, 2013, s. 45). Yhteisen alustan avulla keskinäinen orientointi on tunnettu ja stabiili. Systemin kalibroinnin jälkeen tiedetään alustan avulla myös kyseisten sensoreiden sijainnit. Lisäksi laitteiden kalibrointiin ajatellaan kuuluvan laitteiden keskinäisen synkronoinnin. Synkronointiin käytetään esimerkiksi GPS-vastaanottimen lähettämää pulssia, laserkeilaimen taajuutta (Jaakkola et al., 2010) tai laserkeilaimen lähettämää signaalia (Kukko, 2007).

### 3.3.2 Laitteiden ominaisuuksien virhetekijät

Laitteilla on ominaisuuksia, jotka tuntemalla virheitä voidaan vähentää. Laitteiden oikealla asettelulla tai käytöllä parannetaan lopputuloksia. Keilainten eri ominaisuuksilla on suoraa tai välillistä vaikutusta toisiinsa. Vaaja (2012) suosittelee esimerkiksi MLS-keilaimen sijoittamista mahdollisimman ylös. Näin katvealueita jää vähemmän. GPS-satelliittien näkyvyys voi olla tällöin parempi, mutta myös lasersäteen kohtauskulma maanpintaan nähden paranee. Keilaimen optiikka kärsii vedestä ja kondensoitumisesta huonoissa sääolosuhteissa (Alho et al., 2011). Keilaimia suositellaan käytettäväksi yli nollan asteen lämpötiloissa. Kukko, Anttila, Manninen, Kaasalainen ja Kaartinen (2013) ovat silti tehneet onnistuneesti lumimittauksia MLS-keilaimella. Myös laitteen sisäinen tarkkuus on hyvä huomioida. Laitteen valmistaja ilmoittaa suuntien ja etäisyyksien avulla arvion laitteen mittaustarkkuudesta. Tätä tarkkuutta kutsutaan sisäiseksi tarkkuudeksi (Tolonen, 2011, s. 8)

ALS-keilauksessa lentokorkeuden nostaminen heikentää pisteiden mittaustarkkuutta (Holopainen, Hyypä ja Vastaranta, 2013, s. 18). Mittaustarkkuus tai etäisyystarkkuus kuvaa yksittäisen etäisyyshavainnon tarkkuutta (Kukko, 2005). Mittausetäisyys vaikuttaa myös laserin lähetystehoon. Toistotaajuus kuvaa havaintojen määrää sekunnissa eli mittausten nopeutta. Suuri toistotaajuus nopeuttaa mittauksia merkittävästi (Kukko, 2005). Keilaustaajuus kuvaa yksittäistä pyyhkäisyä keilauskulman läpi. Kukon (2005) mukaan keilaustaajuudella on merkitystä etenkin MLS-keilauksessa. Suuri keilaustaajuus heikentää kulmaerotuskykyä, mikäli pistemittaustaajuutta ei vastaavasti nosteta.

Pulssin koolla ja muodolla on vaikutusta kohteen tarkkaan näkyvyyteen (Hyypä ja Hyypä, 2003). Pulssin muotoon vaikuttavat sijainnin lisäksi kohteen kaltevuus sekä materiaali (Heritage ja Large, 2009). Kaartinen ja Hyypä (2008, s. 47) totesivat, että pulssin tiheyden lisäämisellä ei ollut vaikutusta puiden luokittelun tarkkuuteen. Kaartinen (2013) toteaa, että laseraineistoista tehtävässä tulkinnassa saadaan parempia tuloksia, kun käytetään ensimmäisen kaiun lisäksi viimeistä kaikua.

Laitteen fyysisten ominaisuuksien virheet tulisi havaita hyvissä ajoin. Kukon (2005) mukaan jo likaantunut laite heikentää paluusignaalia. Laitteen akun keston pitäisi olla myös riittävä, jotta tarvittavat mittaukset saadaan tehtyä. Keilaimen tulee olla fyysisesti tarpeeksi tukeva, jotta se ei pääse heilumaan tai jopa kaatumaan kesken mittausten. Kukko (2005)

mainitsee, että MLS-keilauksessa on joskus tarvetta asentaa laitteisto myös ylösalaisin. Tämä ei onnistu kaikilla keilaimilla.

### 3.4 Muut virhetekijät

Itse mittausta häiritsevät yllättävät fyysiset ulkoiset tekijät, kuten säätilat. Tolonen (2011, s. 90) ja Jaakkola et al. (2010) mainitsevat ohi ajaneiden kulkuneuvojen häirinneen TLS- ja UAV-mittauksia. Alho et al. (2011) mainitsevat laserkeilauksen etuina juuri sen vähäisemmän riippuvaisuuden sääoloista verrattuna fotogrammetrisiin ja kaukokartoituksellisiin menetelmiin. MLS- ja TLS-keilaus ovat ALS-keilausta herkempiä sääolosuhteille (Alho et al., 2011). Väärin käytetty tai huollettu keilain tuottaa vääriä tuloksia tai tuloksia ei saada lainkaan. Liang et al. (2014 a) mukaan keilaimen käyttäjällä on suuri merkitys laadukkaan ja kattavan aineiston hankinnan kannalta.

Ilmakehän taittuminen eli refraktio muuttaa lasersäteen kulkua kohteen ja laitteen välillä (Tikka, 1987, s. 69). Myös maan kaarevuus aiheuttaa etäisyysvirhettä (Tolonen, 2011, s. 37). MLS-keilaimen kohtuullisen lyhyillä keilausetäisyyksillä tällainen virhe ei ole kovin haitallinen. Tolonen (2011, s. 37) mainitsee maan kaarevuuden aiheuttaman virheen olevan 4,9 mm 250 m matkalla.

Joihinkin virhetekijöihin on jo keksitty tyydyttäviä ratkaisuja. Keilausaineistojen systemaattiset virheet poistetaan maastotukipisteillä. Korkeuden kalibrointiin hyödynnetään tunnettujen kohteiden korkeuksia (Hyypä ja Hyypä, 2003). Sensoreiden systemaattiset virheet poistetaan mittaamalla tai hyödyntämällä tunnettuja kohteita aineiston läheltä (Kaartinen, 2013, s. 45). Myös tiedot virheiden keskinäisistä yhteyksistä auttavat niiden vähentämisessä. Vilhomaan (2010) mukaan etäisyydenmittausvirhe ei vaikuta juurikaan muihin virhelähteisiin. Silti etäisyydenmittausvirhe näkyy virheenä ilmalaserpisteen korkeudessa.

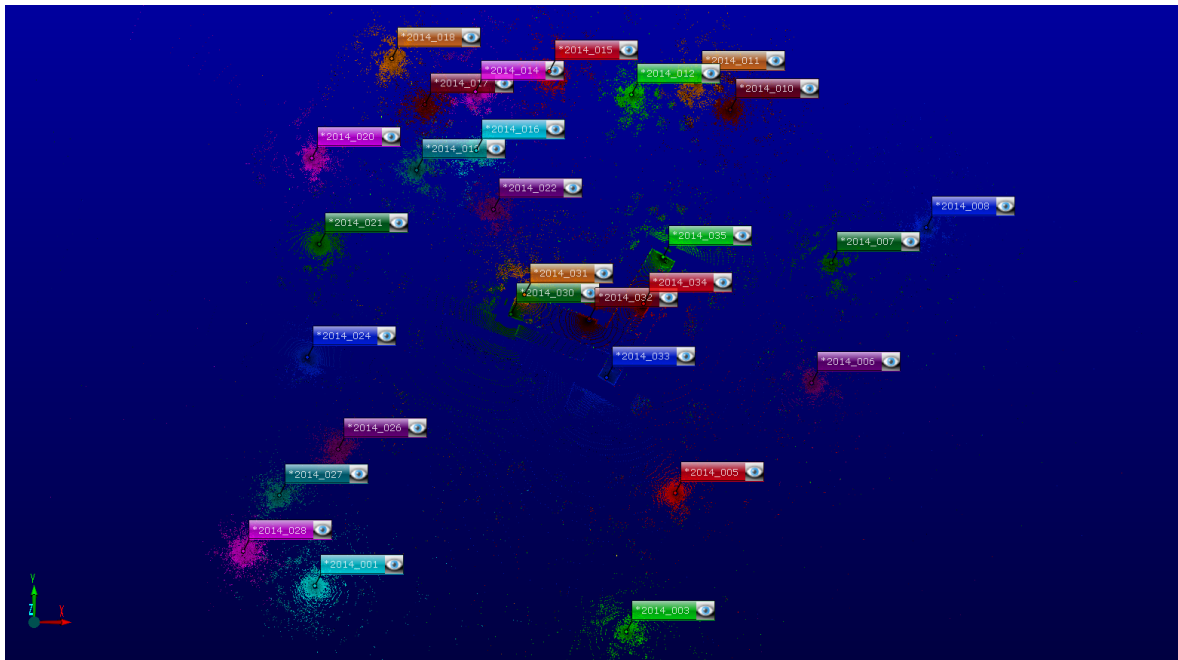
## 4. Tutkimuksen aineistot ja menetelmät

Tässä luvussa esitellään tutkimuksen toteutus. Luvussa 4.1 kuvaillaan TLS-keilaimella mitattu vertausaineisto ja siihen tehdyt esityöt. Luvussa 4.2 esitellään PLS-keilaimella mitattu koeaineisto ja sen esikäsittely. Luvussa 4.3 kuvataan maanpintaluokittelu. Luvussa 4.4 tarkastellaan trajektorin leikkauskohtien hakua. Luvussa 4.5 kuvaillaan käytetyt yhteensovitusmenetelmät ja niiden tarkastelut.

### 4.1 TLS-vertausaineisto

Tutkimuksen tulosten vertailuissa käytettiin FARO Focus3D X 330 -maalaserkeilaimella mitattuja aineistoja. Vertailussa verrattiin kahta erilaisella keilaimella mitattua laserkeilausaineistoa toisiinsa. Jaakkola et al. (2010) ovat vertailleet laserkeilausaineistoja samantyyppisesti. Vertausaineisto mitattiin samalta alueelta kuin tutkimuksen koeaineisto. TLS-mittaukset toteutettiin kesällä 2014 kahdessa osiossa. Vertausaineistosta käytettiin aineistoja vain koeaineiston alueelta. Ensimmäisellä mittauskerralla toteutettiin 28 TLS-keilausta (Kuva 1) ja toisella mittauskerralla 16 TLS-keilausta. Ensimmäisellä mittauskerralla käytettiin 67 pallotähystä ja toisella mittauskerralla 8 pallotähystä. Toisella mittauskerralla kunkin pallotähyksen sijainti mitattiin GNSS-paikannuksen avulla.

Yhdessä mittauksessa kului aikaa 02:47 minuuttia ja 05:53 minuuttia, jos pistepilven lisäksi mitattiin kuvat ympäristöstä. Kunkin keilausalueen koko oli 10240\*4267 pistettä. TLS-keilain mittasi 43,7 miljoonaa pistettä. Pisteiden etäisyys oli 6,136 mm/10 m. Aineistot saatiin valmiiksi georeferoituina ja suodatettuina. Vertausaineiston esikäsittely tehtiin FARO Scene -ohjelmalla. Tiedostot olivat pts-muotoisia. Pts-muotoiset tiedostot muutettiin TerraScan-ohjelmalla LAS-muotoisiksi tiedostoiksi.



Kuva 1. Kuvankaappaus FARO Scene -ohjelmasta. Kuvassa näkyy vertausaineiston ensimmäisen mittauskerran pistejoukkojen keskinäiset sijainnit. Kuva: Miska Kauppinen

## 4.2 PLS-koeaineisto

Koeaineisto kerättiin Geodeettisen laitoksen ympäristöstä liikkuvalla Akhka R2 -henkilökohtaisella laserkeilaimella (Personal Laser Scanner, PLS) 7.5.2013. Toinen testiaineisto kerättiin 4.9.2013 (Taulukko 1). Akhka R2 -selkäreppukeilain kehitettiin Geodeettisella laitoksella vuonna 2013 (Liang et al., 2014 a).

Selkäreppukeilain koostuu FARO Focus3D 120 -laserkeilaimesta ja NovAtel SPAN GNSS-IMU-paikannusjärjestelmästä. NovAtel SPAN pitää sisällään NovAtel UIMU-LCI IMU-järjestelmän (Inertial Measurement Unit) sekä NovAtel Flexpak6 GNSS-satelliittipaikannusvastaanottimen, joka hyödyntää GPS- ja GLONASS-paikannussatelliittien signaaleja (Liang et al., 2014 a). Selkäreppukeilain sisältää myös virtalähteet, paikannustietojen tallennukseen mini-PC:n sekä laserkeilaimen ohjausyksikön. Akhka R2 painaa noin 22 kg (Kukko, 2013).

Taulukko 1. Koeaineistojen mittauksessa käytetyt keilausparametrit: Akhka R2 -PLS. Taulukko: Antero Kukko

	7.5.2013	4.9.2013
Kulmaresoluutio	0.070°	0.044°
Pistemittaustaajuus	488 kHz	488 kHz
Profiilimittaus	95 Hz	60 Hz

Akhka R2:lla mitattu laserkeilausaineisto georeferoitiin käyttämällä Waypoint Inertial Explorer -ohjelmistossa jälkilaskettua trajektoria. Aineisto kattoi maastoa monipuolisesti. Aineisto sisälsi rakennuksen ympäristöstä tietä ja metsää. Aineisto sisälsi eniten metsää, koska tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää geometrisen laadun parantamista paikannussignaalia heikentävässä metsäympäristössä. Tiealueella mitattiin laitteiston kalibrointimitauksia. Aineiston hankinta ja georeferointi toteutettiin ennen tutkimusta ja ne eivät kuuluneet tähän tutkimukseen.

PLS-keilaimella kuljettiin koetyöalueen halki useasta eri suunnasta kävelynopeudella. Mittausvaiheessa kuljettiin samat kohdat useampaan kertaan. Näin aineistoista saatiin laaja ja kattava. Käytetty koordinaattijärjestelmä oli ETRS-TM35FIN, joten korkeudet olivat ellipsoidisia korkeuksia.



Kuva 2. Kuvankaappaus TerraScan-ohjelmasta. Kuvaan on merkitty vihreällä värillä PLS-keilaimella kuljettu laskennallinen reitti eli koeaineiston trajektori

Tutkimuksen aluksi aineistolle tehtiin lisää esikäsittelyä. Pistepilvi muodostui pienemmistä erillisistä rxi-pistetiedostoista eli blokeista. Rxi-tiedostojen sisäänluku tutkimuksessa käytettyyn TerraScan-ohjelmaan oli hidasta. Rxi-tiedostot muutettiin LAS-muotoisiksi (ASPRS LASer File Format) TerraScan-ohjelmalla. LAS on yleinen tiedostomuoto, jota käytetään 3-ulotteisilla pistepilviaineistoilla. LAS-muoto toimi nopeammin ja se vei vähemmän tietokoneen muistitilaa. Pistetiedostoissa oli tyypillisesti noin 4–5 miljoonaa pistettä. Aineiston trajektori (Kuva 2) saatiin erillisenä tekstitiedostona. Tekstitiedosto sisälsi GPS-ajan lisäksi trajektorin E- (easting), N- (northing) ja h-koordinaatit (ellipsoidinen korkeus) kullakin ajanhetkellä. Trajektori oli laskettu keilaimen koordinaatiston origoon eli trajektori sijaitsi noin 2 m maanpinnan yläpuolella. Koeaineisto mitattiin yhdellä kerralla. Aineiston mittaamisessa kului aikaa 2040,99 sekuntia eli noin 34 minuuttia.

Aineistojen käsittelyssä käytettiin Terrasolidin TerraScan-ohjelman 014.007-versiota. TerraScan-ohjelma on kaupallinen ohjelma, joka on tarkoitettu laserkeilauspistepilvien käsittelyyn. Samaa ohjelmaa oli käytetty jo aiemmin aineistojen käsittelyyn. TerraScan-ohjelmaa oli helppo käyttää myös tiedostojen visuaaliseen tarkasteluun. TerraScan-ohjelma on erityisesti ALS-laserkeilausaineistojen käytössä tunnettu ohjelma.

TerraScan-ohjelmaan luotiin erillinen Delete-luokka, johon luokiteltiin aineiston virheellisiä pisteitä. Liang et al. (2014 a) ovat tehneet virheellisten pisteiden poistoa samaan tapaan. Delete-luokan avulla väärin luokitellut pisteet palautettiin tarvittaessa takaisin käyttöön. Intensiteettiärvolla 0–9000 olevat pisteet poistettiin prosessista Delete-luokkaan. Tällaiset pisteet ovat tyypillisesti vääriä, heijastuneita tai liian kaukaisia pisteitä.

Yksittäisiä hajapisteitä poistettiin aineistosta TerraScan-ohjelman Isolated points -työkalulla (Soininen A., 2012 b, s. 244). Työkalu siirtää harvoja eli yksittäisiä pisteitä Delete-luokkaan, jos niiden ympäriltä ei löydy vähintään kahta pistettä tietyn etäisyyden päästä. Tämän aineiston etäisyytenä käytettiin 0,1 m. Isolated points -työkalu poisti koeaineiston reunoilta yksittäiset hajapisteet. Koko aineiston pistetiheys tulee huomioida, kun mietitään yksittäisten pisteiden poistoon sopivaa rajaetäisyyttä ja parametreja. Aineistosta poistettiin myös manuaalisesti silmäämääräisesti nähtäviä yksittäisiä, irrallisia, epäolennaisilta vaikuttavia pisteitä.

### 4.3 Maanpintaluokittelu

Pistepilviaineiston geometrista tarkkuutta haluttiin korjata. Jokaiselta yksittäiseltä pistejoukolta haluttiin löytää koko aineistoa yhdistäviä piirteitä. Näin koko pistejoukon käsittelyyn voitiin toteuttaa samalla menetelmällä. Yhdistävä tekijä auttaisi myös menetelmien toteuttamiseen muilla aineistoilla. Kukko (2014) ehdotti maanpinnan hyödyntämistä yhteensovittamisessa. Maanpintaa löytyi jokaiselta aineiston pistejoukolta ainakin jonkin verran. Maanpinnan olemassaolo on tyypillisesti ympäristöstä riippumaton tekijä. Maanpintaa löytyy niin metsistä kuin kaupungeista. Maanpinta voisi olla muukin alhaalla sijaitseva pinta, esimerkiksi lattia sisätiloissa.

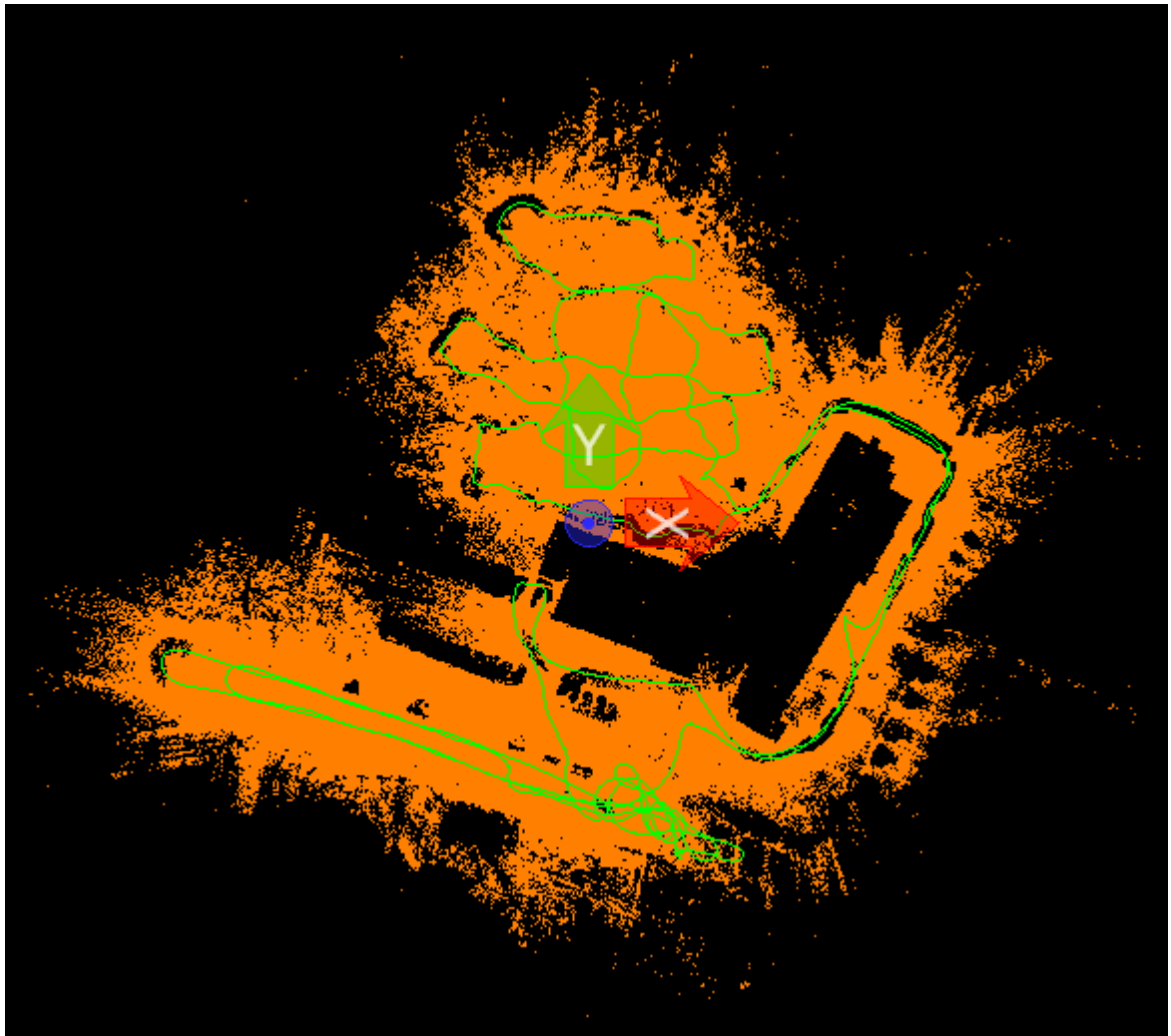
Maanpinta ei tyypillisesti ehdi muuttua liikaa, vaikka aineisto olisi mitattu hieman eri kohdista tai eri ajanhetkinä. Esimerkkinä mittausten aikana mahdollisesti heiluvista kohteista voidaan mainita puut. Hyyppä ja Hyyppä (2003) arvioivat, että puiden latvoihin voi tulla keilausten välillä 1,5 m sijaintiero esimerkiksi tuulen vaikutuksesta. Tähyksiä tai muita valmiita kiintopisteitä ei voitu hyödyntää PLS-koeaineistossa, koska niitä ei ollut käytetty mittauksissa. Menetelmän ideana oli taata mahdollisimman onnistunut MLS-aineistojen yhdistäminen erilaisista olosuhteista tai sijainnista riippumatta.

Maanpinta muodostettiin puoliautomaattisella maanpintaluokittelulla. Maanpintaluokitteluun käytettiin ensin TerraScan-ohjelman Add point to Ground -työkalua (Soininen A., 2012 b, s.247). Työkalu perustuu TIN-kolmiointiin sekä lähimmän xy-pisteen etsimiseen (Axelsson, 2000; Soininen, 2012 b, s.66). Tutkimuksessa kokeiltiin myös toista maanpintaluokittelua. TerraScan-ohjelman Hard Surface -työkalu on ohjelman uudempi ominaisuus (Soininen, 2012 a). Hard Surface -luokittelussa käytetään maanpinnan mediaania Add point to Ground -työkalun paikallisten minimipisteiden sijaan. TerraScan-ohjelmalla ei voinut käsitellä MLS-aineistoa suoraan halutulla tavalla, joten PLS-keilaimen trajektoria jouduttiin muokkaamaan ennen maanpintamallin luontia.

Add point to Ground -työkalussa osoitettiin manuaalisesti aloituspisteitä maanpinnasta laskentaa varten. Vaaditut kolme aloituspistettä kannatti osoittaa siten että ne muodostivat kolmion. Pisteiden tuli sijaita maanpinnalla, jotta malli muodostui mahdollisimman oikein. Hard Surface -työkalu ei vaatinut manuaalisesti esitettyjä pisteitä maanpinnasta. Add point to Ground -työkalulla tuotettu maanpinnan malli näytti Hard Surface -työkalun mallia pie-

nemmältä, mutta yhtenäisemmältä. Hard Surface -työkalun malli oli laajemman näköinen, mutta se ei ollut yhtä tiheä kuin Add point to Ground -työkalun tuottama malli. Molempien tuottamista maanpintamalleista jouduttiin poistamaan manuaalisesti malleihin jääneitä puita, autoja ja muita maanpintaan kuulumattomia kohteita.

Add point to Ground -työkalussa käytettiin maanpintakulmana (Terrain angle)  $88^\circ$  ja iteraatiokulmana (Iteration angle)  $22^\circ$ . Iteraatiovälinä (Iteration distance) oli 0,1 m. Muita toimintoja ei otettu mukaan laskentaan. Hard Surface -työkalussa käytettiin Plane tolerancena ohjelman oletusarvoa 0,1 m. Ohjelman oletusarvoja käytettiin myös Iteration detailissa  $4 \text{ m}^2$  ja trianglessa 0,1 m. Max iteration slopeksi asetettiin  $88^\circ$  ja iteraatiokulmaksi (Iteration angle)  $22^\circ$ . Maanpintaluokittelussa käytetyt arvot valittiin manuaalisesti visuaalisen arvioinnin perusteella. Hard Surface -työkalun tuottamaan maanpintamalliin jäi enemmän puita kuin Add point to Ground -työkalun malliin. Myös valitut parametrit vaikuttivat lopputulokseen. Soinisen (2012 a) mukaan Add point to Ground -luokittelu sopii paremmin maastoille ja Hard Surface -työkalu asfalttipinnoille. Tutkimuksessa käytettiin suositusten mukaisesti Add point to Ground -työkalulla luokiteltuja maanpintoja (Kuva 3).



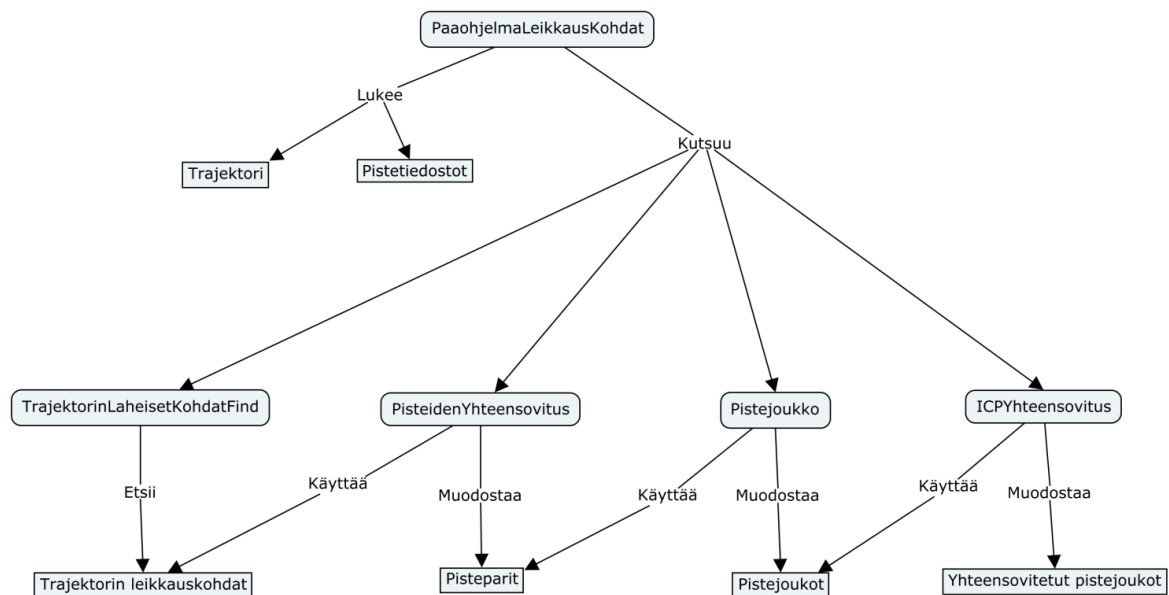
Kuva 3. Kuvankaappaus TerraScan-ohjelmasta. Kuvassa on merkitty vihreällä PLS-koeaineiston trajektoria. Oranssilla on merkitty koeaineiston pistepilvi Add point to Ground -maanpintaluokittelun jälkeen

## 4.4 Trajektorin leikkauskohtien haku

MLS-aineistojen geometrinen laatua haluttiin parantaa metsäympäristössä. Parantamista tutkittiin PLS-koeaineistolla. Koeaineiston trajektorista etsittiin leikkauskohtia (Kukko, 2014). Leikkauskohdilla tarkoitettiin kohtia, joissa keilain mittasi vähintään kaksi kertaa eri ajanhetkinä. Tällöin samalta alueelta saatiin kaksi erilaista pistejoukkoa. Pistejoukkoja sovitettiin yhteen. Virheiden vuoksi eri kohtiin joutuneet pistejoukot haluttiin yhteensovituksen avulla keskenään oikeaan kohtiin.

Trajektorin leikkauskohtien haku toteutettiin Matlab-ohjelmalla. Matlab-ohjelma on yleisesti käytetty ja tunnettu kaupallinen laskentaohjelma. Matlab-ohjelmalla tehtiin myös tutkimuksen myöhemmät pistepilvien ja trajektorin käsittely. Matlab-ohjelmasta löytyi paljon valmiita luotettavia matemaattisia funktioita. Matlab-ohjelmaan löytyi valmiina myös muiden käyttäjien itse tekemiä sovelluksia. Tutkimuksessa Matlab-ohjelmalla toteutetut kokonaisuudet tehtiin pääsääntöisesti itse. Apuna käytetyt muiden käyttäjien tekemät ohjelmat esitellään luvussa 4.5.2 ICP tarkemmin. Matlab-ohjelmasta valmiina löytyviä funktioita ei ole tässä työssä eritelty. Tutkimuksessa käytettiin myös Matlab-ohjelman Statistics Toolbox -lisäosaa laskennan nopeuttamiseksi. Matlab-ohjelmalla saatuja valmiita yhteensovitetuja pistetiedostoja haluttiin käyttää suoraan myös Terrasolid-ohjelmalla, siksi Matlab-ohjelmalla saadut pistetiedostot tallennettiin tekstitiedostoina.

Yhteensovitusta varten Matlab-ohjelmalla luotiin PaaohjelmaLeikkauskohdat-ohjelma. Ohjelma toimi pääohjelmana, joka kutsui tarvittavat aliohjelmat. Lähtöaineistona tutkimuksessa oli trajektori ja sen pistetiedostot. Lopputuloksena saatiin yhteensovitetuja pistejoukkoja trajektorin leikkauskohdista. PaaohjelmaLeikkauskohdat-pääohjelma koostui neljästä eri aliohjelmasta (Kuva 4).



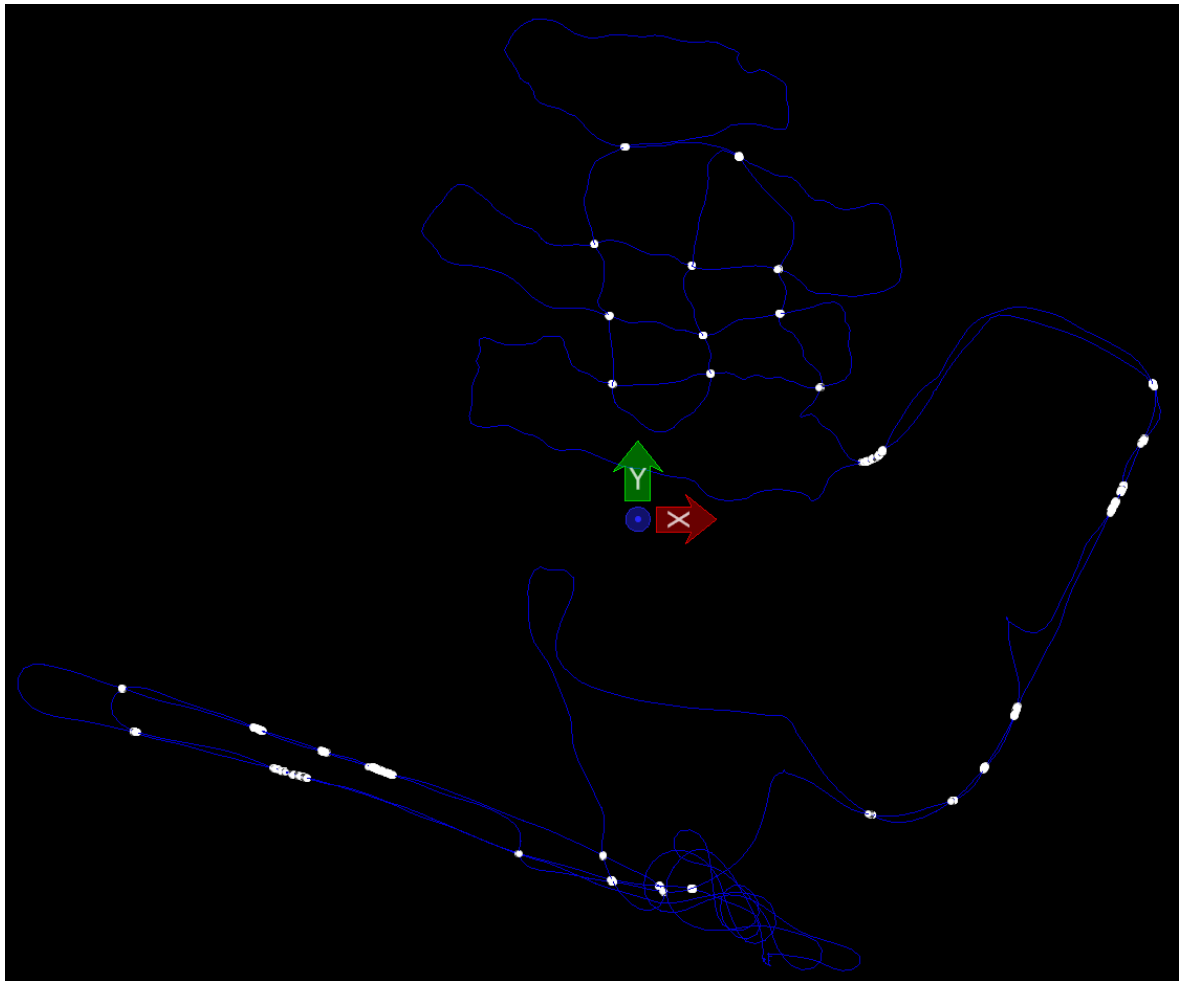
Kuva 4. Käsitetä yhteensovitukseen käytetyistä Matlab-ohjelmista. Käsitetä kuvaa ohjelmien välisiä yhteyksiä ylhäältä alaspäin. Matlab-ohjelmat on merkitty kuvaan pyöreäreunaisilla laatikoilla. Käytetyt ja luodut aineistot on merkitty nelikulmaisilla laatikoilla. Ohjelmien ja aineistojen väliset toimenpiteet on kuvattu teksteillä ilman laatikkoa



Ensimmäinen aliohjelmista oli TrajektorinLaheisetKohdatFind-aliohjelma. Se etsi trajektorista leikkauskohdat (Kuva 5). Trajektorista löytyi myös kohtia, joissa oli kuljettu erittäin lähellä, mutta ei ollut kuljettu aiemman kohdan yli. Vierekkäin kuljetuilla kohdilla pitäisi olla yhteisiä pisteitä, kuten leikkauskohdilla. Vierekkäisiä kohtia varten tehtiin erillinen ohjelma. Sitä ei käytetty tässä tutkimuksessa, koska suurin osa löydetystä vierekkäisistä kohdista sijaitsi leikkauskohtien läheisyydessä. Leikkauskohdiksi valittiin kohtia, joissa vähintään kaksi eri ajanhetkinä mitattua trajektorin pistettä sijaitsivat pohjois- ja itäsuunnissa kynnysetäisyyden päässä toisistaan. Kynnysetäisyytenä käytettiin tässä tutkimuksessa 0,05 m. Kynnysetäisyys valittiin kokeellisesti koeaineistoon sopivaksi.

Pohjois- ja itä-suuntien haut toteutettiin Matlab-ohjelman valmiilla Find-funktiolla. Find-funktio etsi kaikki halutut ehdot täyttävät arvot ja niiden indeksit. Ensin etsittiin itäsuunnasta ehdot täyttävät trajektorin arvot ja indeksit. Löydetystä indekseistä etsittiin pohjois-suunnan ehdot täyttävät arvot. Jo löydetty pisteparit poistettiin hausta, jotta samoja kohtia ei etsitty monta kertaa. Haku kokeiltiin toteuttaa myös Matlab-ohjelman For-silmukalla. For-silmukka oli Find-funktiota hitaampi ajaa. Find-funktiota käytettiin myös siten että etsittiin kummankin suunnan täyttävät ehdot erikseen. Löydetystä kohdista etsittiin sitten yhteiset indeksit. Tutkimukseen valittu ensimmäinen menetelmä todettiin nopeimmaksi ohjelman ajon kannalta.

Trajektorin leikkauskohdista muodostettiin ViereisetKohdat-tekstitiedosto. Tekstitiedosto sisälsi leikkauskohtien indeksit. Kullakin rivillä oli ensimmäisenä trajektorista löydetty kohta ja sen perässä muiden samassa sijainnissa olleiden kohtien indeksit. Trajektorin alussa ja lopussa oli yhteensovituksen kannalta ylimääräisiä ajanhetkiä. Ylimääräiset ajanhetket olivat aikoja, jolloin trajektoria mittaavat paikannuslaitteet olivat olleet päällä, mutta PLS-keilain ei ollut mitannut. Aliohjelmassa poistettiin käsittelystä nämä trajektorin alku- ja loppuosat, joilta ei ollut mitattuja pisteitä. Trajektorin käsittely nopeutui hieman, kun turhia leikkauskohtia ei etsitty. Leikkauskohtien etsiminen tuotti aluksi hankaluuksia. Leikkauskohtien lisäksi löytyi paljon ylimääräisiä kohtia. Tarkemmilla rajauksilla saatiin haluttu lopputulos.



Kuva 5. Kuvankaappaus TerraScan-ohjelmasta. Kuvassa sinisellä on merkitty kuljettu reitti eli trajektori. Valkoisella värillä on visualisoitu TrajektorinLaheisetKohdatFind-aliohjelmalla löydetty trajektorin leikkauskohdat

Toinen aliohjelma oli PisteidenYhteensovitus-aliohjelma. Aliohjelmassa luettiin jokaisen pistetiedoston GPS-alku- ja loppu-ajat. GPS-ajoista muodostettiin lista. GPS-listan avulla löydettiin trajektorin leikkauskohtia vastaavat ajanhetket. Jos leikkauskohtien ajanhetket olivat pistetiedostojen GPS-alku- ja loppu-ajan välissä, niin leikkauskohtaa vastaavat pisteet löytyivät kyseisestä pistetiedostosta. Aliohjelma muodosti edellisessä kohdassa löydettyistä kohdista pareja. Lopuksi ohjelma muodosti Pistetiedostolista-tekstitiedoston. Tekstitiedostoon merkittiin kukin muodostettu pari ja niitä vastaavien pistetiedostojen indekset. PisteidenYhteensovitus-aliohjelma käytti myös TrajektorinLukuVrs3-aliohjelmaa. TrajektorinLukuVrs3-aliohjelma oli muunneltu TrajektorinLuku-aliohjelmasta. TrajektorinLukuVrs3-aliohjelmassa käytettiin apuna Image Analyst -nimimerkin (2012) avointa koodia Matlab-ohjelmiston keskustelualueelta.

Pistejoukko-aliohjelma oli kolmas tehty aliohjelma. Se käytti apunaan edellisellä aliohjelmalla luotua tekstitiedostoa. Pistejoukko-aliohjelmassa luettiin tarvittavien pistetiedostojen GPS-ajat ja pisteet muuttuihin. Pistetiedostoista etsittiin leikkauskohtien GPS-aikaa vastaavat alkuperäiset ja loppu-ajanhetket. Pistetiedostoissa oli useampia pisteitä, joilla oli sama GPS-aika. Tällaisissa tapauksissa pisteistä valittiin ensimmäinen.

Pistejoukko-aliohjelma etsi kunkin leikkauskohdan jokaisen pisteparin ympäriltä viiden metrin säteellä olevat pisteet. Ensin leikkauskohdasta muodostettiin ylä- ja alarajat pohjois- ja itäsuunnissa kynnysetäisyyden 5 m avulla. Sitten pistetiedostoista etsittiin rajojen sisään sopivat pisteet Find-funktion avulla. Aiempaan tapaan etsittiin ensin itäsuunnassa sopivat pisteet. Sitten etsittiin näistä itäsuunnan pisteistä myös pohjoissuunnan ehdot täyttävät pisteet. Leikkauskohtien pisteet sijaitsivat tyypillisesti kahdessa eri pistetiedostossa. Näin saatiin kaksi erilaista pistejoukkoa, jotka oli mitattu samasta kohdasta. Aliohjelmassa oli myös huomioitu se mahdollisuus, että pistejoukko oli jakautunut useampaan eri pistetiedostoon. Pistejoukot tallennettiin Pistejoukko1\_1\_ground- ja Pistejoukko1\_2\_ground-tekstitiedostoihin. Aliohjelma käytti apunaan TrajektorinLukuVrs2-aliohjelmaa. Kyseinen aliohjelma muunneltiin TrajektorinLuku-aliohjelmasta. Apuna käytettiin myös PisteidenLukuPisteet-aliohjelmaa. Se oli muunneltu PisteidenLuku-aliohjelmasta.

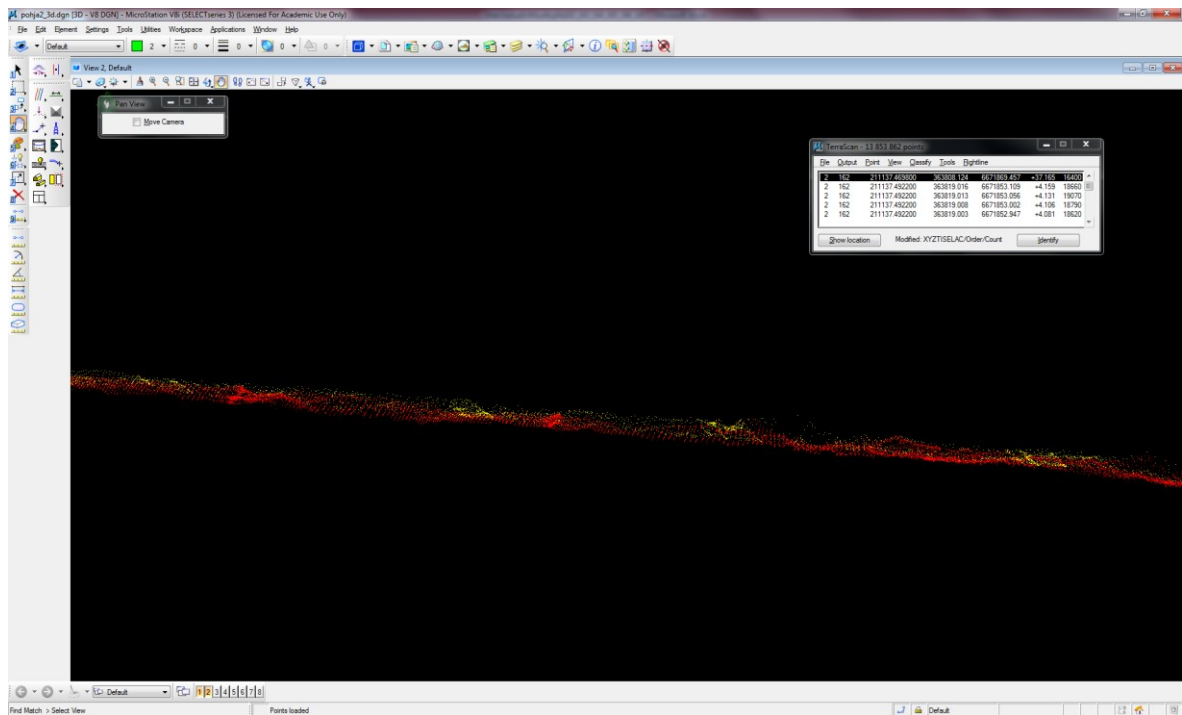
## 4.5 Yhteensovitusmenetelmät

Leikkauskohdista muodostettiin Matlab-ohjelmalla pistejoukkoja, jotka olivat 5 m etäisyydellä leikkauskohdan keskipisteestä. Näitä muodostettuja pistejoukkoja sovitettiin toisiinsa pareittain Matlab-ohjelmalla toteutetulla ICP-menetelmällä (Iterative Closest Point). Yhteensovituksen toteuttamiseen kokeiltiin myös Terrasolidin TerraMatch-ohjelmaa. TerraMatch-ohjelma oli hidas käyttää, koska se vaati paljon manuaalista työskentelyä.

### 4.5.1 TerraMatch-ohjelma

Tutkimuksessa kokeiltiin käyttää yhteensovittamiseen ensin Terrasolid-ohjelmaperheeseen kuuluvaa TerraMatch-ohjelmaa. TerraMatch-ohjelma käytti pistepilviaineistojen yhdistämiseen maanpintojen välistä yhteensovitusta. Ohjelma vertaili maanpinnan pisteitä tunnettuihin vertailumaanpinnan pisteisiin. Vertailumaanpinta muodostettiin automaattisesti suorilla, joihin muodostui pisteistä varianssia syvyysuunnassa (Terrasolid, 2011). TerraMatch-ohjelma muodosti yhteensovitetusta aineistosta kolmiomalleja. Kolmiomallit muodostettiin lentolinjoittain, koska ohjelma oli suunnattu ALS-aineistojen käsittelyyn (Terrasolid, 2011).

Suurin ongelma TerraMatch-ohjelman käytössä oli se, että se vaati paljon manuaalista työtä. Käsien tehty yhteensovitus TerraMatch-ohjelmalla vei myös paljon aikaa. Lisäksi PLS-trajektoria käsiteltiin ja muokattiin erikseen, jotta se toimi TerraMatch-ohjelmassa oikein. TerraMatch-ohjelmassa kullakin lentolinjalla tuli olla oma trajektoritiedostonsa. PLS-keilaimen trajektori tallentui yhtenä tiedostona. PLS-keilaimen trajektori pilkottiin pienemmiksi palasiksi pistetiedostoittain, jotta PLS-keilaimen pistetiedostoja voitiin yhteensovittaa TerraMatch-ohjelmalla (Kuva 6). Pistetiedostoja luettaessa jokaisen tiedoston oma pilkottu trajektorin osa luettiin omana trajektorinaan TerraMatch-ohjelmaan.



Kuva 6. Kuvankaappaus TerraMatch-ohjelmasta

Trajektorin pilkonta pienempiin osiin toteutettiin tutkimuksessa Matlab-ohjelmalla. Pääohjelma Trajektori-ohjelma toimi pääohjelmalla. Sitä kutsumalla saatiin luettua kullekin pistetiedostolle oikea trajektorin osa. TrajektorinLuku-aliohjelma luki koko trajektoritiedoston. Trajektoritiedoston tuli olla txt-muotoinen. Oletuksena trajektoritiedostosta löytyivät GPS-aika sekä E-, N- ja h-koordinaatit. PisteidenLuku-aliohjelma luki kunkin pistetiedoston. Apuna käytettiin Puttonen ja Litkey (2014) tekemää GL matlas\_tools -ohjelmaa. GL matlas\_tools -ohjelma luki ja muutti LAS-tiedostomuotoiset pistepilviaineistot Matlab-ohjelmaan sopiviksi tiedostoiksi. Trajektorin\_pilkonta-aliohjelma etsi trajektorin oikean osan pistetiedostojen GPS-alku- ja lopetusaikojen perusteella. Trajektori2Txt-aliohjelma kirjoitti löydetyn trajektorin osan tekstitiedostoon. Trajektorin pilkkomista varten tehtyjä ohjelmia hyödynnettiin yhteensovittusta varten tehdyissä ohjelmissa.

#### 4.5.2 ICP

TerraMatch-ohjelman käyttö PLS-koeaineiston yhteensovituksessa oli hidasta ja vaati paljon manuaalista työtä, joten haluttiin kehittää tehokkaampi, automaattinen ratkaisu. TerraMatch-ohjelman sijaan valittiin Matlab-ohjelma laskennallisen puolen toteutukseen. Pistepilvien yhteensovittamiseen käytettiin pintojen yhteensovittusta eli ICP-menetelmää (Iterative Closest Point). ICP-menetelmä on yleisesti tunnettu yhteensovitusmenetelmä. ICP-menetelmä soveltuu parhaiten jo valmiiksi lähekkäin olevien kohteiden keskinäisen sijainnin parantamiseen. Tutkimuksessa koeaineiston pistejoukkoja verrattiin vastaavassa kohdassa oleviin eri ajanhetkellä mitattuihin pistejoukkoihin. ICPYhteensovitus-aliohjelma oli tutkimuksessa tehdyn pääohjelman neljäs aliohjelma.

## ICP-algoritmi (Iterative Closest Point)

Pistejoukko1 = Pistejoukko1:n kaikkien pisteiden E-, N-, h-koordinaatit matriisina siten että Pistejoukko1(n) sisältää Pistejoukko1:n n:n pisteen E-, N- ja h-koordinaatit.

Pistejoukko2 = Pistejoukko2:n kaikkien pisteiden E-, N-, h-koordinaatit matriisina siten että Pistejoukko2(n) sisältää Pistejoukko2:n n:n pisteen E-, N- ja h-koordinaatit.

Maksimaalinen iteraatiolukumäärä = Vapaasti valittu iteraatiokierrosten lukumäärä. Tutkimuksessa käytetty iteraatiolukumäärä oli 1000.

Knn-haku = Matlab-ohjelman Statistics toolbox -lisäosan valmis Knnsearch-funktio.

Kabsch-laskenta = Schreiberin (2009) Matlab-ohjelmalla tekemä valmis Kabsch-ohjelma.

```
for i = 1:Maksimaalinen iteraatiolukumäärä
    for j = 1:Pistejoukko1:n pituus
        Pistejoukko1(j):n lähin naapuri pistejoukko2:sta Knn-haulla.
    end
    Pistejoukko1:n ja Pistejoukko2:n naapuripisteet Kabsch-laskentaan. Laskennasta tuloksena Kiertomatriisi ja Siirto.
    for j=1:Pistejoukko2:n pituus
        Uusi Pistejoukko2(j) = Kiertomatriisi*Pistejoukko2(j)+Siirto
    end
    Pistejoukko2 = Uusi Pistejoukko2
end
```

**end**

(Esim. Gressin, Mallet, Demantké ja David, 2013)

ICPYhteensovitus-aliohjelma luki Pistejoukko-aliohjelmalla luoduista pistejoukoista kaksi kerrallaan. Toinen pistejoukoista valittiin paikallaan pysyväksi pistejoukoksi. Toista pistejoukkoa liikutettiin ensimmäisen pistejoukon suhteen. Pistejoukkoja yritettiin saada lähemmäs toisiaan. Tutkimuksessa kokeiltiin siirtää kumpaakin pisteparin pistejoukkoa vuorollaan. Lopullisessa tutkimuksessa siirrettiin kunkin pisteparin pienempää pistejoukkoa. Valinta perustui siihen, että pienempi pistejoukko oli nopeampi ajaa ohjelmalla.

Pienempää pistejoukkoa oli nopeampaa liikuttaa, koska siinä oli vähemmän pisteitä. Toisaalta suuremmassa pistejoukossa oli enemmän pisteitä, joita saattoi siirtää oikeampaan kohtaan. Ennen sovitus ei ollut mahdollista tietää, kumpi pistejoukoista oli aluksi enemmän sijainnillisesti oikein. Jokaiselle paikallaan olevalle pisteelle etsittiin vastinpiste liikutettavasta pistejoukosta. Vastinpisteparit muodostettiin etsimällä euklidisesti lähimmällä etäisyydellä oleva piste toisesta pistejoukosta. Euklidinen etäisyys ei tuottanut välttämättä heti oikeaa vastakkaista pistettä, koska pistetiedostot saattoivat olla ennen yhteensovitusta siirtyneitä suhteessa toisiinsa. Vastinpisteparien etsintä tapahtui Matlab-ohjelman Statistics toolbox -lisäosan valmiilla Knnsearch-funktiolla.

Oikean keskinäisen kierron ja siirron etsimiseen käytettiin Kabsch-menetelmää (Kabsch, 1976). Tutkimuksessa Kabsch-ohjelma toteutettiin ensin itse, mutta lopullisessa versiossa päätettiin käyttää valmista Schreiberin (2009) tekemää avointa Kabsch-ohjelmaa. Valmis Kabsch-ohjelma oli nopeampi ajaa Matlab-ohjelmalla. Kabsch-menetelmää käytettiin Jaakkolan (2014) suosittelemana. Kabsch-menetelmässä pistejoukot siirrettiin ensin yhteiseen origoon. Pisteistä laskettiin kovarianssimatriisi SVD:n (Singular Value Decomposition) avulla. SVD:n tuloksista saatiin tarvittavat kiertomatriisi ja siirto. Tutkimuksessa käytettiin painottamatonta kovarianssimatriisia.

Liikutettavaa pistejoukkoa kerrottiin Kabsch-menetelmästä saadulla kiertomatriisilla. Pistejoukkoon lisättiin myös siirto. Lopputuloksena saadusta pistejoukosta tuli uusi liikutettava pistejoukko. Pisteiden yhteensovitus toteutettiin tutkimuksessa 1000 iteraatiokierrosta kullakin pistejoukko-parilla. Jokaisella kerralla kaikki pistejoukkojen pisteet olivat käytössä. Uusi yhteensovituksella liikutettu pistejoukko kirjoitettiin UudPisteet1\_2-tekstiedostoon. Pistetiedostot tallennettiin txt-muotoisiksi, jotta ne voitiin avata helposti sekä Matlab- että TerraScan-ohjelmilla.

### 4.5.3 Menetelmät tarkkuuden arviointiin

Yhteensovituksesta voidaan selvittää aineistoon tullut geometrinen virhe. Aineiston geometrista laatua voidaan parantaa jakamalla virhettä aineistoon. Virheen jatkokäsittely ei kuulunut työn aiheeseen. Aineiston tarkkuuden ja suorituskyvyn arviointiin on kehitetty erilaisia matemaattisia malleja. Mallit mahdollistavat erilaisten menetelmien ja järjestelmien numeerisen vertailun.

Liang et al. (2014 a) käyttivät puun sijainnin tarkkuuden analysoinnissa keskineliövirheen neliöjuurta (Root-Mean-Square Error, RMSE) (Kaavat 4 ja 5). Liang et al. (2014 a) esittivät tarkkuuden tutkimiseen käyttämilleen parametreille seuraavat kaavat:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (y_i - y_{ri})^2}{n}}. \quad (4)$$

$$RMSE\% = \frac{RMSE}{\bar{y}_r} \times 100 \%. \quad (5)$$

Kaavoissa

$n$	on estimaattien lukumäärä
$y_i$	on i. estimaatti
$y_{ri}$	on i. referenssi
$\bar{y}_r$	on referenssiarvojen keskiarvo

Mellin (2006, s. 35) on esittänyt keskihajonnalle (Standard Deviation, SD tai STD) seuraavan kaavan:

$$s = \sqrt{\frac{1}{r-1} \sum_{i=1}^r (x_i - \bar{x})^2}. \quad (6)$$

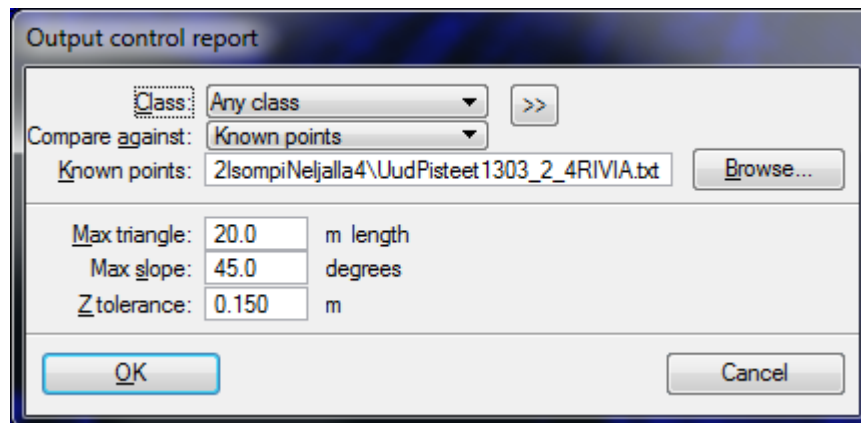
Kaavassa

$r$	on estimaattien lukumäärä
$\bar{x}$	on luvuista $x_1, x_2, \dots, x_r$ laskettu aritmeettinen keskiarvo

Aineistojen geometrisen laadun arviointiin korkeussuunnassa käytettiin TerraScan-ohjelman Output control report -työkalua. TerraScan-ohjelman ohjeen (Soininen, 2012 b, s. 139) mukaan Output Control Report -työkalu soveltuu hyvin korkeuserojen tarkasteluun. Output Control Report -työkalussa käytettiin ohjelman oletusarvoja (Kuva 7). Maksimaalisen kolmion säteenä oli 20 m. Output Control Report -työkalu etsi keskenään verrattavat pisteet maksimaalisen kolmion sisältä. Maksimaalinen kaltevuuskulma oli 45°. Output

Control Report -työkalu laski korkeuseroja maksimaalisen kaltevuuskulman alapuolelta. Z-toleranssina käytettiin 0,150 m. Output Control Report -työkalu käytti z-toleranssia vain silloin, kun maksimaalista kaltevuuskulmaa ei voitu käyttää (Soininen, 2012 b, s. 139).

Vertailujen ensimmäiset tiedostot valittiin vertailtaviksi tiedostoiksi. Vertailujen jälkimmäiset tiedostot luettiin tunnetuiksi pisteiksi. Tiedostot on esitetty samassa järjestyksessä taulukoissa luvussa 5. Tulokset ja tarkastelu. Pisteparien keskinäinen järjestys olisi voitu valita myös toisinpäin. Pistejoukkojen keskinäisen järjestyksen valintaan ei ollut erityistä kriteeriä. Tutkimuksessa käytettiin uudempia TerraScan-ohjelman versioita kuin mitä TerraScan-ohjelman käyttöohjeissa (Soininen, 2012 b) on esitelty.



Kuva 7. Kuvankaappaus tutkimuksessa käytetyn TerraScan-ohjelman 013.008-version Output Control Report -työkalun ominaisuuksien valinnasta 30.7.14

TerraScan-ohjelman Output Control Report -työkalun tuottamat h-suuntaisten erojen laskelmat tallennettiin tekstitiedostoina. Kunkin vertailun raportissa oli jokaisen pistejoukon pisteen numero, E- ja N-koordinaatit, h-koordinaatit kummastakin pistejoukosta sekä pistejoukon jokaisen pisteparin keskinäiset korkeuserot. Tekstitiedoston loppuun koottiin kummankin pistejoukon yhteinen korkeuserojen (h-koordinaatit) keskiarvo, pienin sekä suurin korkeusero. Tekstitiedostossa ilmoitettiin myös keskiarvoinen magnitudi, neliöllinen keskiarvo (RMS) ja keskihajonta (SD). Keskihajonnan (SD) yleinen kaava (Kaava 6) on esitetty luvussa 4.5.3 Menetelmät tarkkuuden arviointiin.

Output Control Report -työkalu käytti pistetiedostoja, joissa ensimmäinen sarake sisälsi kunkin pisteen nimen ja kolmessa seuraavassa sarakkeessa oli E-, N- ja h-koordinaatit. Tutkimuksessa oli käytetty aiemmin pistetiedostoja, joissa oli vain E-, N- ja h-koordinaatit. Kuhunkin pistetiedostoon lisättiin jokaisen rivin eteen uusi sarake, jossa oli juokseva numerointi ykkösestä pistetiedoston loppuun. Sarakkeen lisäys toteutettiin itse tehdyllä Matlab-ohjelmalla.

Tutkimuksessa haluttiin selvittää korkeuserojen lisäksi myös mahdollista E- ja N- sekä heading-kiertokulmamutosta. Liang et al. (2014 a) mukaan huono GNSS-kuuluvuus vaikutti myös PLS-keilaimen heading-kiertokulmaan. Mahdollisten E-, N- ja kiertokulmamutosten vaikutusta ei saatu selville Output Control Report -työkalulla. E- ja N-suuntien sekä kiertokulman vaikutusta tutkittiin manuaalisten vertailujen avulla. Jokaisista vertailtavista pistejoukoista etsittiin yhteinen piirre maastosta. Valitun piirteen välinen E- ja N-ero saatiin selville osoittamalla samaa kohtaa kummastakin pistejoukosta TerraScan-ohjelman alustana toimivan MicroStation-ohjelman Toggle AccuDraw -työkalulla. Saatuja E- ja N-

eroja käytettiin tutkimuksessa. E- ja N-etäisyydet otettiin kunkin pistejoukkoparin väliltä neljä kertaa. Toimenpide oli manuaalinen, mikä lisäsi tulosten epätarkkuutta. Saaduista E- ja N-eroista laskettiin niiden välinen pienempi kulma (Kaava 7) eli korkeussuunnan ympäri oleva heading-kiertokulma. Heading-kiertokulma oli määritelty E- ja N-eroille vain, jos molemmat suunnat olivat  $\neq 0$ . Heading-kiertokulma  $\gamma$  laskettiin seuraavalla kaavalla vektoreiden skalaaritulosta (Esim. Poutanen, 1998, s. 245):

$$a \cdot b = |a||b| \cos(a, b) = |a||b| \cos(\gamma) \quad (7)$$

Kaavassa

$a \cdot b$  on vektorien a ja b välinen skalaaritulo

$|a|$  on  $\sqrt{a \cdot a}$

$\gamma$  on vektoreiden välinen kulma

Output Control Report -työkalulla toteutettu vertailu tehtiin TerraScan-ohjelman vanhemmalla 013.008-versiolla, koska vanhempi versio toimi uudempaa nopeammin. Vanhemmasta versiosta tuli hieman eri tulokset kuin uudemmasta versiosta. Versioiden välisistä eroista ei löytynyt tietoa TerraScan-ohjelman ohjeesta (Soininen A., 2012 b). E- ja N-suuntien sekä heading-kiertokulmien vertailuihin käytettiin TerraScan-ohjelman uudempaa 014.007-versiota.



## 5. Tulokset ja tarkastelu

Tässä luvussa esitellään tutkimuksen tulokset ja tarkastellaan niitä kriittisesti. Kappaleessa 5.1 kuvataan PLS-koeaineiston sisäisten ja TLS-vertausaineiston kanssa tehtyjen vertailujen tulokset. Kappaleessa 5.2 analysoidaan tulokset ja tarkastellaan niiden syitä. Tutkimuksessa haluttiin selvittää paransiko koeaineistojen yhteensovittaminen koeaineistojen geometrista laatua metsäympäristössä. Koeaineiston sisäisen tarkkuuden parantumista selvitetiin vertailemalla koeaineiston alkuperäisiä pistejoukkoja keskenään ennen ja jälkeen yhteensovitusta. Koeaineiston parantumista suhteessa ulkoiseen aineistoon tutkittiin vertailemalla yhteensovitettuja ja alkuperäisiä koeaineistoja erilliseen vertausaineistoon.

### 5.1 Tutkimuksen tulokset

Tutkimuksessa tehtiin TerraScan-ohjelman Output Control Report -työkalulla korkeussuunnassa sekä manuaalisesti E-, N-suunnissa ja heading-kiertokulman suhteen PLS-koe- ja TLS-vertausaineistojen välillä neljä erilaista vertailua:

1. Vertailtiin yhteensovituksessa käytettyjä PLS-koeaineiston pistejoukkoja ennen liikuttamista ja TLS-vertausaineistoa keskenään.
2. Vertailtiin yhteensovitettuja PLS-koeaineiston pistejoukkoja TLS-vertausaineistoon.
3. Vertailtiin PLS-koeaineiston pisteparien paikallaan pysyneitä pistejoukkoja yhteensovituksessa siirrettyihin pistejoukkoihin.
4. Vertailtiin PLS-koeaineiston pisteparien alkuperäisiä paikallaan pysyneitä pistejoukkoja yhteensovituksessa käytettyihin pistejoukkoihin ennen yhteensovitusta.

Esiteltujen neljän vertailun välillä tehtiin lisäksi joitakin matemaattisia vertailuja. Vertailujen keskinäisissä vertailuissa tarkasteltiin yhteensovituksen aiheuttamia muutoksia. Muutosten vertailu toteutettiin laskemalla yhteensovitusta ennen ja jälkeen saatujen itseisarvoisten tulosten väliset erotukset. Vertailuissa otettiin erikseen tarkasteluun metsäalueen pistejoukot.

Vertailuissa tarkasteltiin keskiarvoisten ellipsoidisten korkeuserojen, korkeussuuntaisten minimi- ja maksimiarvojen sekä keskihajonnan (SD) (Kaava 6) itseisarvoja. Keskiarvoinen korkeusero oli pistejoukon yksittäisten pisteiden välisten korkeuserojen keskiarvo. Minimija maksimiarvot olivat pistejoukkojen pienimmät ja suurimmat yksittäiset korkeuserot. Tutkimuksessa käytettiin vertailujen keskinäisissä vertailuissa itseisarvoja, joten minimikorkeusero saattoi olla itseisarvoisena etäisyytenä suurempi, vaikka se olisi ollut numeerisesti pienin arvo ennen itseisarvojen käyttöä. Korkeuserojen minimi- ja maksimiarvoista saatiin selville yksittäisen pistejoukon korkeuserojen hajonta. Hajontaa tarkasteltiin myös keskihajonnan avulla. Keskihajonta kuvasti sitä, kuinka kaukana pisteiden väliset korkeuserot olivat keskiarvoisesta korkeuserosta. Suuri keskihajonta kertoi, että pistejoukon pisteet olivat keskenään eri etäisyydellä toisesta pistejoukosta.

Korkeuserojen minimi- ja maksimiarvoista havaittiin oliko pistejoukossa yksittäisiä pisteitä, jotka olivat kaukana muista aineistojen pisteistä. Vertailuissa käytettiin raportista saatujen lukujen ja manuaalisten mittausten itseisarvoja. Itseisarvoja käytettiin, koska tällöin saatiin muuttujien etäisyys nolasta. Aineistojen välisten etäisyyksien suuruusluokat olivat tärkeämpiä kuin etäisyyksien suunnat, kun tavoitteena oli saada aineistot mahdollisimman lähelle toisiaan eli aineistojen väliset erot lähelle nollaa. Heading-kiertokulmista ja

keskihajonnasta käytettiin alkuperäisiä arvoja, koska kaikki heading-kiertokulmat ja keskihajonnat olivat positiivisia arvoja matemaattisen määritelmänsä mukaan (Kaavat 7 ja 6).

Liian lähellä toisiaan trajektorilla sijainneet koeaineiston pistejoukot poistettiin käsittelystä silmämääräisesti ennen tulosten vertailua. Jokaisesta leikkauskohdasta käytettiin kerrallaan kahta koeaineiston pistejoukkoa. Pistejoukot olivat kooltaan 10 m\*10 m. Toista koeaineiston pistejoukkoa liikutettiin yhteensovituksen aikana ja toinen pistejoukoista pysyi paikallaan. Käytetyt 57 pisteparista muodostettua 114 pistejoukkoa on esitetty Kuvassa 8. Lisäksi käytössä oli TLS-vertausaineisto. Jokainen vertailu ja leikkauskohta käsiteltiin erikseen.

Vertailuissa 3–4 käytettiin kaikkia 57 leikkauskohdasta muodostettuja pistejoukkoja. Vertailuissa 1–2 käytettiin vain 42 leikkauskohtaa. Trajektorin oikealla sivulla (Kuva 8) kuljettiin rakennuksen ulkoseinän vierestä. Kyseisestä kohdasta ei ollut tutkimuksessa saatavilla TLS-vertausaineistoa, joten kyseinen alue jätettiin pois vertailuista 1–2. Tutkimuksessa haluttiin selvittää geometrisen laadun parantamista metsäympäristössä, joten seinänvierustan poisjättäminen ei vaikuttanut tutkimuksen kannalta olennaisiin lopputuloksiin.

Vertausaineistoon kuului myös tutkimusalueen ulkopuolisia alueita. Vertausaineiston pistetiedostoista valittiin vertailuihin manuaalisesti aina se pistetiedosto, joka näytti visuaalisesti peittävän parhaiten kyseisen leikkauskohdan pistejoukon. Ennen vertailuja jokaiselle TLS-vertauspistetiedostolle tehtiin maanpintaluokittelu TerraScan-ohjelman Add point to Ground -työkalulla. Käytetty työkalu ja valitut arvot olivat samat, joilla tehtiin maanpintaluokittelu alkuperäiselle PLS-koeaineistolle. Maanpintaluokittelusta on kerrottu tarkemmin luvussa 4.3 Maanpintaluokittelu. Maanpintaluokittelu tuli tehdä samalla menetelmällä koe- ja vertausaineistoille, jotta vertausaineistoa voitiin käyttää luotettavasti tulosten vertailuissa. Vertausaineistot olivat pistemääriltään suurempia pistetiedostoja kuin rajatut PLS-pistetiedostot.



Kuva 8. Kuvankaappaus TerraScan-ohjelmasta. Kuvaan on merkitty sinisellä värillä PLS-keilaimella kuljettu laskennallinen reitti eli trajektoria. Leikkauskohdista yhteensovitusta varten muodostetut PLS-pistejoukot ovat merkitty kuvaan eri väreillä

Kuvan 8 vasemmalla alhaalla olevasta lähes vaakasuuntaan kulkevasta trajektorin linjasta käytetään myöhemmin tutkimuksessa nimitystä ”tiealue”. Tiealueella sijaitsivat pistejoukot 1–620 sekä 1423–1433. Ylhäällä keskellä olevasta trajektorin alueesta käytetään myöhemmin tutkimuksessa nimitystä ”metsäalue”. Metsäalueella olivat pistejoukot 1056–1422. Oikealla lähes pystysuuntaan kulkevasta alueesta käytetään myöhemmin tutkimuksessa nimitystä ”seinänvierusta”. Seinänvierustalla sijaitsivat pistejoukot 621–1023.

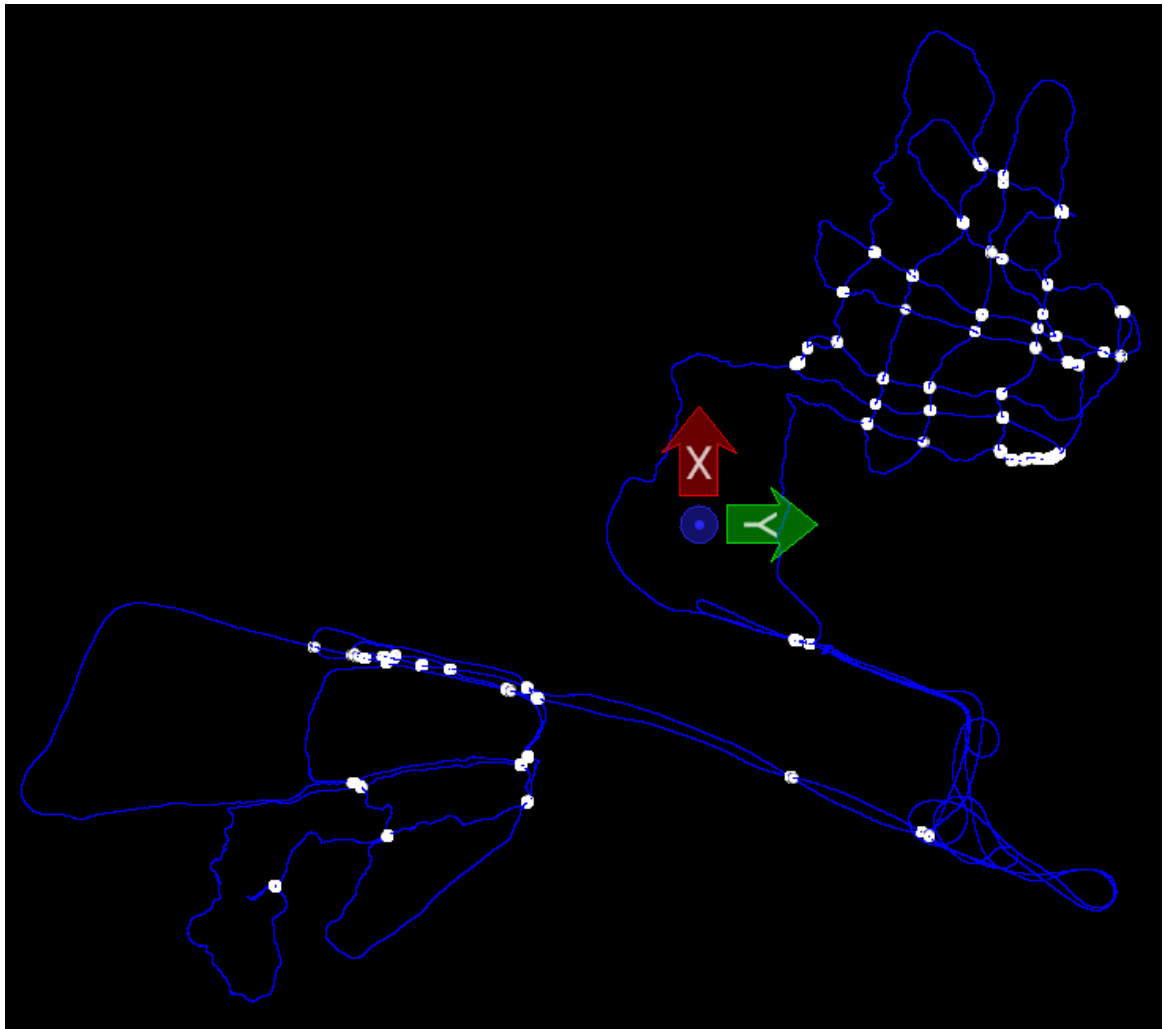
Vertailujen tuloksia esittävät taulukot löytyvät kokonaisuudessaan liitteenä. Vertailujen 1–4 tuloksia esittäviin taulukoihin on merkitty punaisella värillä aina kunkin vertailun keskiarvoja suuremmat eli huonommat arvot. Vertailujen välisiä keskiarvojen erotuksia koostaviin taulukoihin on merkitty punaisella värillä huonompaan suuntaan muuttuneet erot. Vastaavasti vertailujen 1–4 tuloksia esittäviin taulukoihin keskiarvoja pienemmät eli lähempänä nollaa olevat paremmat arvot on merkitty vihreällä värillä. Vertailujen keskinäisiä erotuksia osoittaviin taulukoihin on merkitty vihreällä värillä parempaan suuntaan muuttuneet erot.

Neutraalilla, keltaisella värillä on merkitty  $\pm 0,0010$  m ja  $1^\circ$  olevat ja niitä pienemmät arvot. Vertailutaulukoissa neutraaliväri tarkoitti erittäin hyvää arvoa. Neutraalit arvot on laskettu mukaan keskiarvojen alapuolella oleviin arvoihin ja hyviin muutoksiin. Yhteensovitusten aiheuttamia muutoksia tarkasteltaessa keltaisella värillä on merkitty kohdat, joissa aineistojen keskinäinen muutos oli erittäin vähäistä. Kunkin vertailun pienimmät ja suu-

rimmat arvot on merkitty taulukoihin oranssilla fontilla. Pistejoukon numero on merkitty tietyllä välillä, jos yli puolet pistejoukon arvoista edustaa positiivista tai negatiivista suuntausta. Metsäalueen pistejoukot on merkitty vertailutaulukoihin tummennetulla fontilla. Taulukoihin on merkitty aina jokaisen pistejoukon numero. Pistejoukon numeron vieressä näkyy pistejoukkojen välisten vertailujen arvot.

### 5.1.1 Trajektorin leikkauskohtien haun tulokset

Trajektorin leikkauskohtien etsimistä kokeiltiin myös toisella vastaavalla 4.9.2013-mitatulla PLS-koeaineistolla. Toinen koeaineisto oli samoilla menetelmillä ja alueelta mitattu, mutta tutkimuksen aineistoa laajempi. Toinen PLS-kokeiluaineisto oli suurempi, mutta toimi myös oikein tutkimuksessa käytetyillä ohjelmilla ja menetelmillä (Kuva 9). Toisen PLS-kokeiluaineiston tuloksia ei esitellä tässä työssä. Toisella PLS-kokeiluaineistolla haluttiin varmistaa, että trajektorin leikkauskohdat löytyvät ja pistejoukot voidaan muodostaa muistakin MLS-aineistoista kuin tutkimuksessa käytetystä koeaineistosta. Kokeilun perusteella havaittiin, että Matlab-ohjelma soveltuu myös muihin vastaaviin MLS-aineistoihin.



Kuva 9. Kuvankaappaus TerraScan-ohjelmasta. Kuvassa on esitetty toisen, 4.9.2013 mitatun koeaineiston trajektorin peilikuva sinisellä värillä. Valkoisella värillä on merkitty trajektorista löytyneet leikkauskohdat

Toteutetulla Matlab-ohjelmalla löydettiin PLS-koeaineiston trajektorista kaikki halutut leikkauskohdat (Kuva 5). Leikkauskohtien löytyminen edellytti koeaineistolle sopivaa kynnysetäisyyttä 0,05 m. Leikkauskohtien hausta on kerrottu tarkemmin luvussa 4.4 Trajektorin leikkauskohtien haku. PLS-koeaineiston pistetiedoista ei löydetty kaikkia trajektorista löydettyjä leikkauskohtia. Vaikka keilain pyöri, niin osa maastosta jäi silti katveeseen. Trajektorin löytämiltä leikkauskohdilta ei ollut siis aina mitattu keilaimella pisteitä, jos alue kuului keilaimen katvealueeseen. Joskus keilaimella mitattuja pisteitä ei ollut sen takia, että mitattu kohde oli liian kaukana keilaimesta eikä paluukaikuja ollut saatu. Osa koeaineiston pisteistä oli suodatettu pois jo esikäsittelyn aikana. Välillä trajektorin leikkauskohdan ajanhetkeltä löytyi useita eri pisteitä, koska keilain ehti mitata valtavan määrän pisteitä lyhyessä ajassa.

### 5.1.2 ICP-yhteensovituksen korkeussuuntaiset tulokset PLS-koeaineiston ja TLS-vertausaineiston väliltä

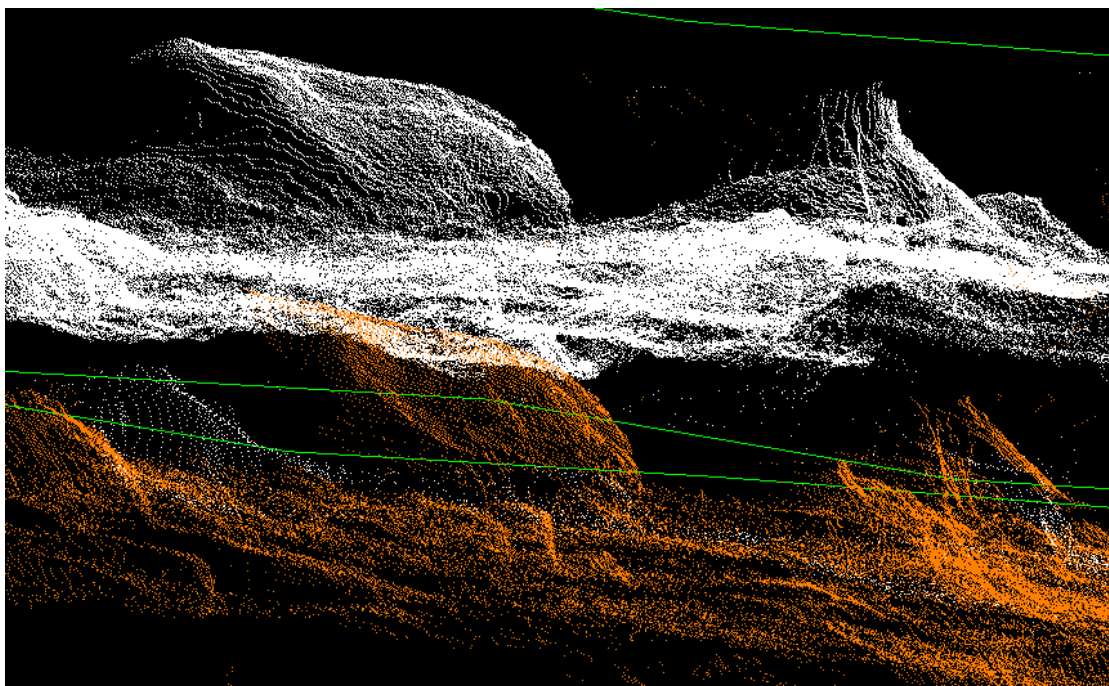
Taulukko 2. Vertailu 1, jossa vertailtiin koeaineiston yhteensovitetuja pistejoukkoja ennen yhteensovitusta ja vertausaineistoa keskenään

<b>Vertailu 1. Yhteensovitetut ennen yhteensovitusta-Vertausaineisto</b>	<b>Keskiarvo dh</b>	<b>Minimi dh</b>	<b>Maksimi dh</b>	<b>Keskihajonta (SD)</b>
<b>Keskiarvoinen etäisyys (m)</b>	<b>0,1145</b>	<b>1,1753</b>	<b>0,4133</b>	<b>0,1105</b>
<b>Pienin etäisyys (m)</b>	<b>0,0006</b>	<b>0,0260</b>	<b>0,1050</b>	<b>0,0080</b>
<b>Suurin etäisyys (m)</b>	<b>0,3011</b>	<b>-6,4910</b>	<b>1,1840</b>	<b>0,4940</b>

<b>Keskiarvoinen etäisyys (metsä) (m)</b>	<b>0,1592</b>	<b>1,3272</b>	<b>0,6102</b>	<b>0,1121</b>
<b>Pienin etäisyys (metsä) (m)</b>	<b>0,0135</b>	<b>-0,1420</b>	<b>0,3440</b>	<b>0,0688</b>
<b>Suurin etäisyys (metsä) (m)</b>	<b>0,3011</b>	<b>-6,4910</b>	<b>1,1840</b>	<b>0,3604</b>

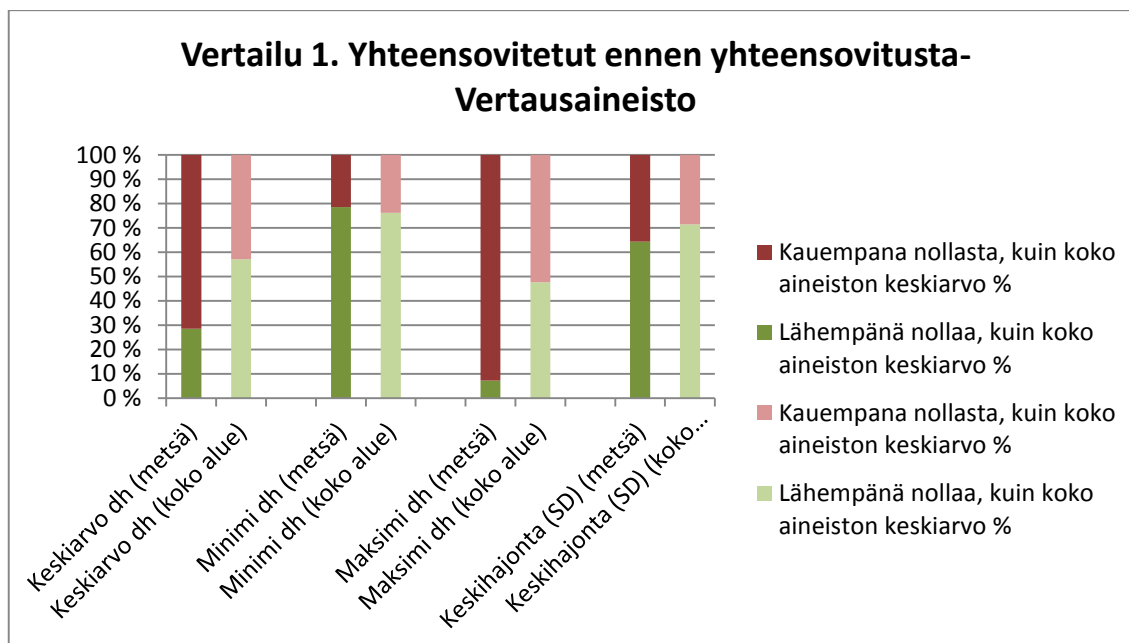
Vertausaineiston ja koeaineiston välisessä vertailussa 1 (Taulukko 2) ennen yhteensovitusta saatiin pistejoukkojen itseisarvoisten korkeuserojen (dh) eli keskiarvokorkeusetäisyyksien keskiarvoksi 0,11 m. Pienin eli paras keskiarvokorkeusetäisyys 0,00 m vertausaineistoon nähden löytyi pistejoukosta 230 (katso Liitteet), joka sijaitsi tiealueella. Tiealueella GNSS-näkyvyyden pitäisi olla metsäympäristöä parempi, koska tie oli aukea alue (Liang et al., 2014 a). Suurin eli huonoin keskiarvokorkeusero 0,30 m vertausaineistoon nähden löytyi metsäalueelta pistejoukosta 1303 (katso Liitteet). Pistejoukon 1303 korkeusero vertausaineistoon nähden näkyy Kuvassa 10. Vertailun huonoimmat keskiarvokorkeuserot löytyivät tyypillisesti metsäalueelta.



Kuva 10. Kuvankaappaus TerraScan-ohjelmasta. Kuvaan on merkitty koeaineiston pistejoukko 1303 ennen yhteensovittusta valkoisella värillä. Vertausaineiston pistejoukko on merkitty oranssilla värillä

Etäisimmät minimi- (-6,49 m) ja maksimietäisyydet (1,18 m) vertausaineistoon nähden löytyivät huonoimman keskiarvokorkeuseron omaavasta metsäalueen pistejoukosta 1303 (katso Liitteet). Muut etäisimmät minimikorkeuserot löytyivät tiealueen pistejoukoista 40–161 (katso Liitteet) ja joistakin muista yksittäisistä pistejoukoista. Kyseisillä tiealueen pistejoukoilla 40–161 keskiarvokorkeusero oli silti lähes kaikissa keskiarvoa parempi. Hyvästä keskiarvokorkeuserosta huolimatta pistejoukosta löytyi yksittäisiä pisteitä, jotka olivat kaukana keskiarvokorkeusetäisyydestä. Vertailun keskihajonnat kuvastivat, että tiealueilla 40–230 (katso Liitteet) sekä metsäalueella olivat suurimmat korkeuserot yksittäisissä pisteissä keskiarvoon nähden.

Metsäalueelta löytyi koko aluetta huonompi keskiarvo jokaisessa muuttujassa (Taulukko 2). Metsäalueen koeaineisto oli siis oletetusti suhteessa kauempana vertausaineistosta kuin koko alueen koeaineisto ennen yhteensovittusta. Koko aineiston huonoimmat yksittäiset arvot löytyivät kaikissa muuttujissa metsäalueelta. Poikkeuksena oli huonoin keskihajonta. Huonoin keskihajonta 0,49 m löytyi tiealueen pistejoukosta 101 (katso Liitteet).



Kuvaaja 1. Vertailu 1, jossa vertailtiin koeaineiston yhteensovitettuja pistejoukkoja ennen yhteensovitusta ja vertausaineistoa keskenään. Kuvaajassa eri muuttujien väliset prosentuaaliset suhteet koko alueella ja metsäalueella

Kuvaajassa 1 ja liitteenä olevassa taulukossa on esitetty prosentuaalisesti pistejoukkojen jakautuminen koko alueen keskiarvoisiin arvoihin nähden. Koko aineistoa tarkasteltaessa jokaisessa muuttujassa suurin osa pistejoukoista oli keskiarvoa parempia eli koko alueen keskiarvon alapuolella. Poikkeuksena olivat maksimietäisyydet, joista reilu puolet (52 %) olivat keskiarvon yläpuolella eli koko alueen keskiarvoa huonompia. Metsäalueella keskiarvokorkeusetäisyydet (93 %) ja maksimikorkeusetäisyydet (71 %) olivat yli puolella pistejoukoista koko alueen keskiarvoa huonompia. Minimietäisyyttä (79 %) ja keskihajontaa (64 %) tarkasteltaessa suurin osa metsäalueen arvoista oli koko aineiston keskiarvoa parempia. Kaikissa muuttujissa oli suhteessa enemmän keskiarvoja parempia pistejoukkoja koko alueella kuin metsäalueella. Poikkeuksena oli maksimietäisyys.

Taulukko 3. Vertailu 2, jossa vertailtiin koeaineiston yhteensovitettuja pistejoukkoja vertausaineistoon

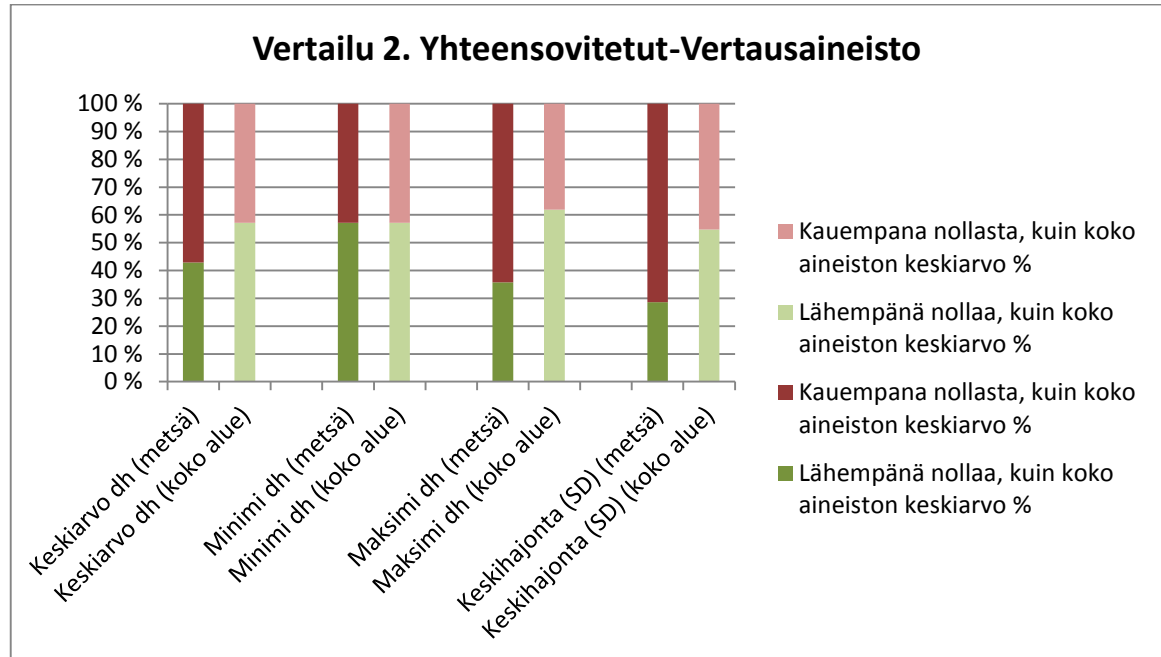
Vertailu 2. Yhteensovitetut-Vertausaineisto	Keskiarvo dh	Minimi dh	Maksimi dh	Keskihajonta (SD)
Keskiarvoinen etäisyys (m)	0,1099	0,6566	0,5598	0,1025
Pienin etäisyys (m)	0,0010	-0,0210	0,1820	0,0126
Suurin etäisyys (m)	0,4807	-3,0130	1,5070	0,3020

Keskiarvoinen etäisyys (metsä) (m)	0,1520	0,8556	0,6341	0,1287
Pienin etäisyys (metsä) (m)	0,0163	-0,0830	0,3990	0,0921
Suurin etäisyys (metsä) (m)	0,4807	-3,0130	0,9920	0,3020

Koeaineiston yhteensovitetettujen ja vertausaineiston välisessä vertailussa 2 suurin osa keskiarvoa huonommista keskiarvokorkeusetäisyyksistä sijaitsi metsäalueella (katso Liitteet). Metsäalueen lisäksi osassa tiealuetta keskiarvokorkeusetäisyydet olivat koko alueen kes-

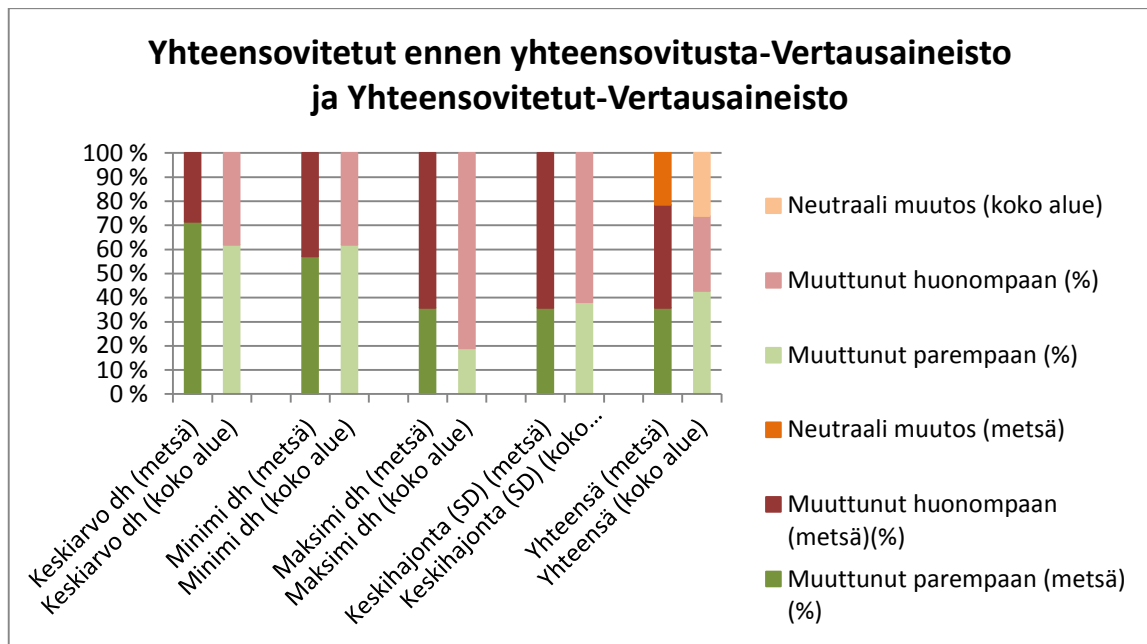
kiarvoa huonompia. Paras keskiarvokorkeusetaisyys 0,00 m löytyi tiealueelta pistejoukosta 230 (Taulukko 3 ja katso Liitteet) ja vastaavasti huonoin 0,48 m metsäalueelta pistejoukosta 1351. Parhaimmat ja huonoimmat yksittäisten pisteiden korkeusetaisyydet näyttivät jakautuneen tasaisesti eri pistejoukkoihin. Huonoin keskihajonta 0,30 m oli metsäalueella pistejoukossa 1303. Huonoja keskihajontoja löytyi lisäksi tiealueen pistejoukoista 40–267 ja 360 sekä metsäalueelta (katso Liitteet). Huono keskihajonta korreloi huonoimpien ja parhaimpien yksittäisten korkeuserojen sijaintien kanssa.



Kuvaaja 2. Vertailu 2, jossa vertailtiin koeaineiston yhteensovitettuja pistejoukkoja vertausaineistoon. Kuvaajassa eri muuttujien väliset prosentuaaliset suhteet koko alueella ja metsäalueella

Metsäalueen keskiarvot olivat jokaisella muuttujalla koko alueen keskiarvoja huonompia (Taulukko 3). Koko aineiston parhaimmat arvot löytyivät metsäalueen ulkopuolelta, kun taas huonoimmat arvot maksimikorkeusetaisyyttä lukuun ottamatta löytyivät metsäalueelta. Huonoin maksimikorkeusetaisyys 1,51 m löytyi keskihajonnan yhteydessä mainitulta tiealueelta pistejoukosta 161 (katso Liitteet). Koko aineistosta jokaista muuttujaa tarkasteltaessa yli puolet pistejoukoista oli koko aineiston keskiarvoja parempia. Metsäalueella jokaista muuttujaa tarkasteltaessa yli puolet pistejoukoista oli koko aineiston keskiarvoja huonompia lukuun ottamatta minimikorkeuseroa. 57 % metsäalueen pistejoukoista oli koko alueen keskiarvoista minimikorkeuseroa parempia.





Kuvaaja 3. Vertailu koeaineiston yhteensovitettujen pistejoukkojen ja vertausaineiston välillä yhteensovitusta ennen ja jälkeen. Kuvaajassa eri muuttujien väliset prosentuaaliset suhteet koko alueella ja metsäalueella

Koeaineiston ja vertausaineiston välisessä vertailussa vähennettiin kunkin vertailu 1:n pistejoukon muuttujan ennen yhteensovitusta oleva arvo vertailu 2:n vastaavan pistejoukon yhteensovituksen jälkeisestä arvosta. Jos pistejoukkojen välinen ero pienentyi eli parantui yhteensovituksen myötä, niin luku oli positiivinen ja on merkitty taulukoihin vihreällä värillä (katso Liitteet). Vastaavasti päinvastaiset muutokset on merkitty taulukoihin punaisella värillä. Neutraalit eli lähes huomaamattomat muutokset on merkitty taulukoihin keltaisella värillä. Pistejoukko-riville (katso Liitteet) on merkitty muutoksen suuntaa kuvaavalla värillä ne rivit, joissa vähintään puolet arvoista edusti negatiivista tai positiivista muutosta. Neutraalit muutokset on merkitty taulukoihin positiivisiksi muutoksiksi. Väritämättä jätetyissä pistejoukoissa puolet arvoista parantui ja puolet huonontui yhteensovituksen myötä.

Vertausaineistolla tehdyissä vertailuissa (Kuvaaja 3 ja katso Liitteet) suurin osa pistejoukoista (62 %) koko alueella muuttui lähemmäs vertausaineistoa eli parantui yhteensovituksen myötä keskiarvokorkeusetaisyysä tarkasteltaessa. Keskiarvokorkeusetaisyyden muutos parempaan oli suhteellisesti suurempi metsäalueella (71 %) kuin koko alueella. Myös yksittäiset minimikorkeusetaisyydet muuttuivat enemmistöllä pistejoukoista parempaan suuntaan molemmilla alueilla. Maksimikorkeusetaisyydet kasvoivat eli huonontuivat yli puolissa pistejoukoista, mikä selittää myös keskihajonnan vastaavan huonontumisen. Vaikka keskihajonta ja yksittäiset maksimikorkeusetaisyydet huonontuivat yli puolissa metsä- ja koko alueen pistejoukkoja, niin suurin osa pistejoukoista (62 % koko alueella ja 71 % metsäalueella) siirtyivät keskiarvoisessa korkeussuunnassa lähemmäs vertausaineistoa yhteensovituksen myötä.

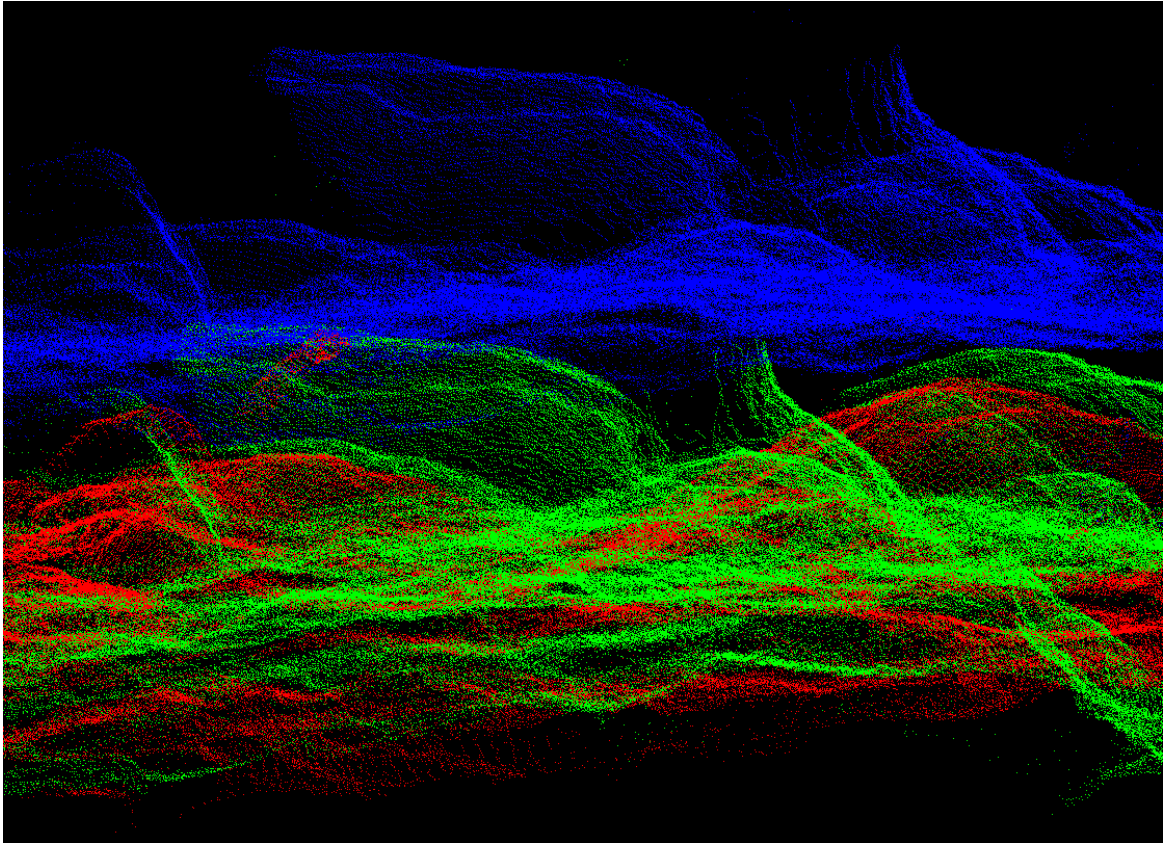
### 5.1.3 ICP-yhteensovituksen korkeussuuntaiset tulokset PLS-koeaineiston sisäisistä vertailuista

Taulukko 4. Vertailu 3, jossa vertailtiin toisiinsa koeaineiston pistejoukkoja ennen ja jälkeen yhteensovitusta

<b>Vertailu 3. Alkuperäiset-Yhteensovitetut</b>	<b>Keskiarvo dh</b>	<b>Minimi dh</b>	<b>Maksimi dh</b>	<b>Keskiha- jonta (SD)</b>
<b>Keskiarvoinen etäisyys (m)</b>	<b>0,0063</b>	<b>0,8949</b>	<b>0,9247</b>	<b>0,0823</b>
<b>Pienin etäisyys (m)</b>	<b>0,0000</b>	<b>-0,0500</b>	<b>0,0540</b>	<b>0,0013</b>
<b>Suurin etäisyys (m)</b>	<b>0,0381</b>	<b>-8,3420</b>	<b>7,6183</b>	<b>0,1875</b>

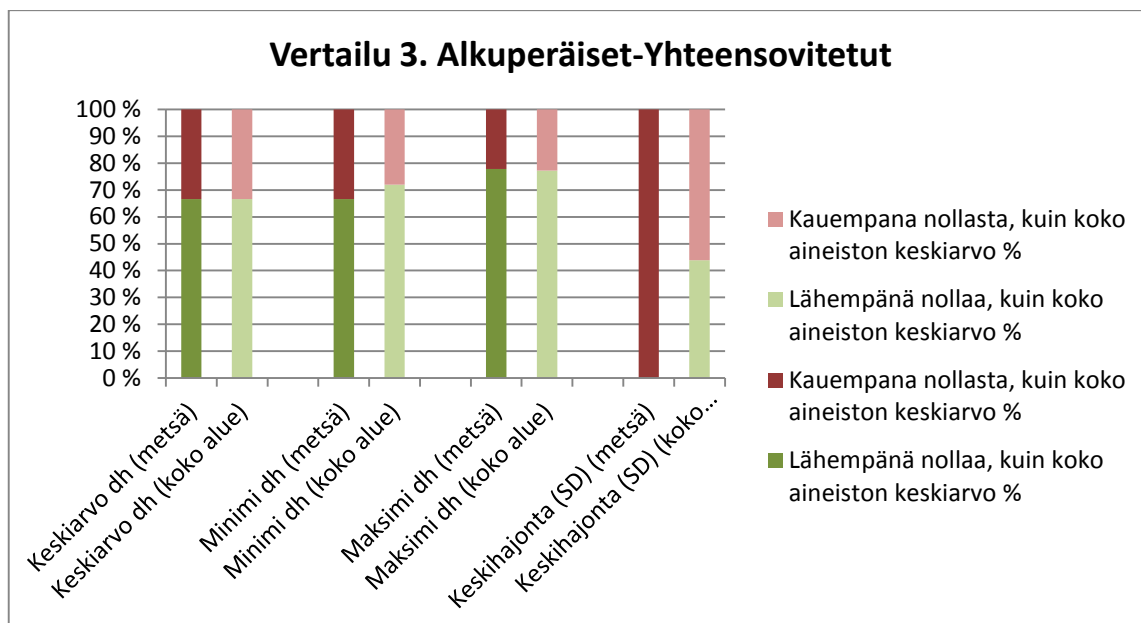
<b>Keskiarvoinen etäisyys (metsä) (m)</b>	<b>0,0080</b>	<b>1,6160</b>	<b>1,3589</b>	<b>0,1163</b>
<b>Pienin etäisyys (metsä) (m)</b>	<b>0,0003</b>	<b>-0,3475</b>	<b>0,3576</b>	<b>0,0829</b>
<b>Suurin etäisyys (metsä) (m)</b>	<b>0,0381</b>	<b>-8,3420</b>	<b>7,6183</b>	<b>0,1875</b>

Koeaineiston alkuperäisten ja yhteensovitettujen välisessä vertailussa 3 (katso Liitteet) keskiarvokorkeusetäisyys oli useissa pistetiedostoissa lähellä nollaa. Lähellä nollaa olleet kohdat on merkitty taulukkoon keltaisella värillä (katso Liitteet). Osa näistä lähellä nollaa olleista keskiarvoista löytyivät jopa metsäalueelta. Toisaalta koko vertailun huonoin keskiarvokorkeusetäisyys 0,04 m löytyi metsäalueelta pistejoukosta 1145 (katso Liitteet). Yksi koko alueen parhaista keskiarvokorkeusetäisyyksistä 0,00 m löytyi metsäalueen pistejoukosta 1303. Pistejoukolla 1303 oli silti muissa muuttujissa koko alueen huonoimmat arvot. Kuvassa 11 näkyy koeaineiston pistejoukko 1303 ennen ja jälkeen yhteensovitusta.



Kuva 11. Kuvankaappaus TerraScan-ohjelmasta. Kuvassa on koeaineiston pistejoukko 1303 ennen ja jälkeen yhteensovitusta. Sinisellä värillä on merkitty pistejoukko 1303 ennen yhteensovitusta ja vihreällä pistejoukko 1303 yhteensovituksen jälkeen. Sinistä pistejoukkoa siirrettiin yhteensovituksessa suhteessa punaiseen pistejoukkoon

Tiealueella ja seinänvierustalla oli paljon koko alueen keskiarvoa huonompia keskiarvokorkeusetäisyyksiä (katso Liitteet). Huonoimmat minimikorkeusetäisyys-alueet löytyivät seinänvierustalta. Huonoimmat minimikorkeusetäisyys -8,34 m ja maksimikorkeusetäisyys 7,62 m löytyivät metsäalueelta pistejoukosta 1303. Samalla pistetiedostolla 1303 (katso Liitteet) oli huonoin keskihajonta 0,19 m. Huonoimmat maksimikorkeusetäisyys-alueet sijoittuivat tyypillisesti huonoimpien keskiarvokorkeusetäisyyksien kanssa samalle alueelle.



Kuvaaja 4. Vertailu 3, jossa vertailtiin toisiinsa koeaineiston pistejoukkoja ennen ja jälkeen yhteensovitusta. Kuvaajassa eri muuttujien väliset prosentuaaliset suhteet koko alueella ja metsäalueella

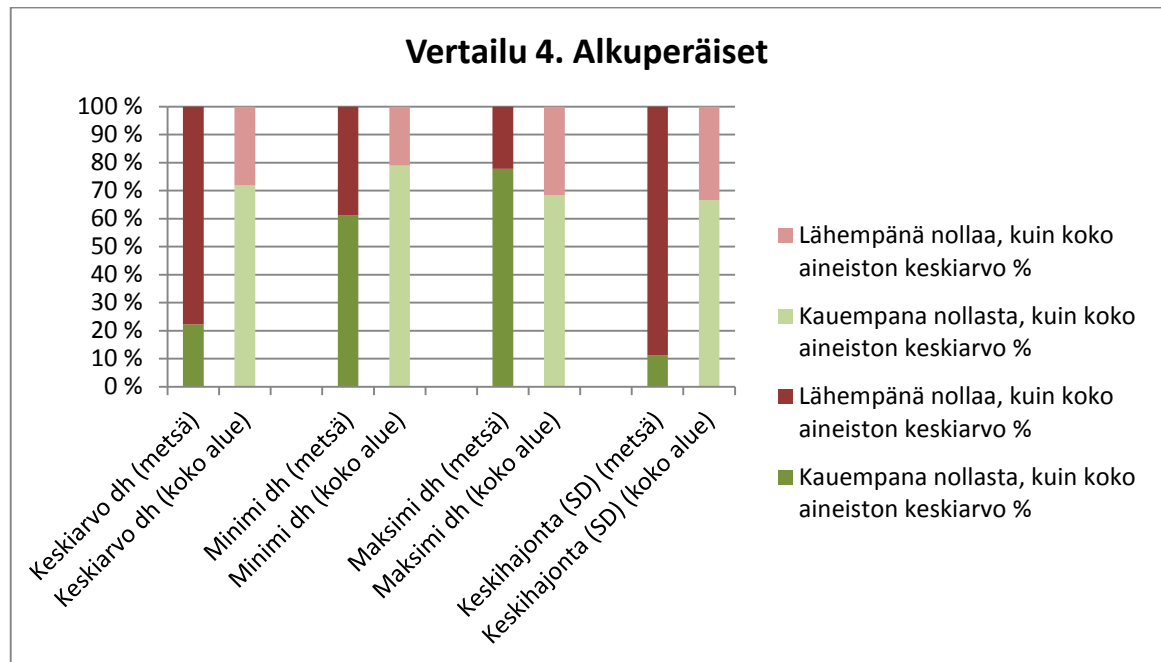
Koeaineiston alkuperäisten ja yhteensovitetujen välisessä vertailussa 3 metsäalueen keskiarvot (Taulukko 4) olivat jokaisella muuttujalla huonommat kuin koko alueen keskiarvot. Samoin jokaisen muuttujan huonoimmat arvot löytyivät metsäalueelta. Koko alueella ja metsäalueella suurin osa pistejoukoista (Kuvaaja 4) oli koko aineiston keskiarvoja parempia keskihajonta-muuttujaa lukuun ottamatta. Metsäalueen kaikkien pistejoukkojen keskihajonnat olivat koko alueen keskiarvoista keskihajontaa huonompia.

Taulukko 5. Vertailu 4, jossa vertailtiin koeaineiston alkuperäisiä paikallaan pysyneitä pistejoukkoja yhteensovituksessa käytettyihin pistejoukkoihin ennen yhteensovitusta

Vertailu 4. Alkuperäiset	Keskiarvo dh	Minimi dh	Maksimi dh	Keskihajonta (SD)
Keskiarvoinen etäisyys (m)	0,0550	0,8145	1,1514	0,0625
Pienin etäisyys (m)	0,0001	-0,0450	0,0290	0,0011
Suurin etäisyys (m)	0,5424	-8,8340	7,4460	0,2981
Keskiarvoinen etäisyys (metsä) (m)	0,1291	1,5931	1,3917	0,1138
Pienin etäisyys (metsä) (m)	0,0017	-0,1670	0,2040	0,0542
Suurin etäisyys (metsä) (m)	0,5424	-8,8340	7,4460	0,2243

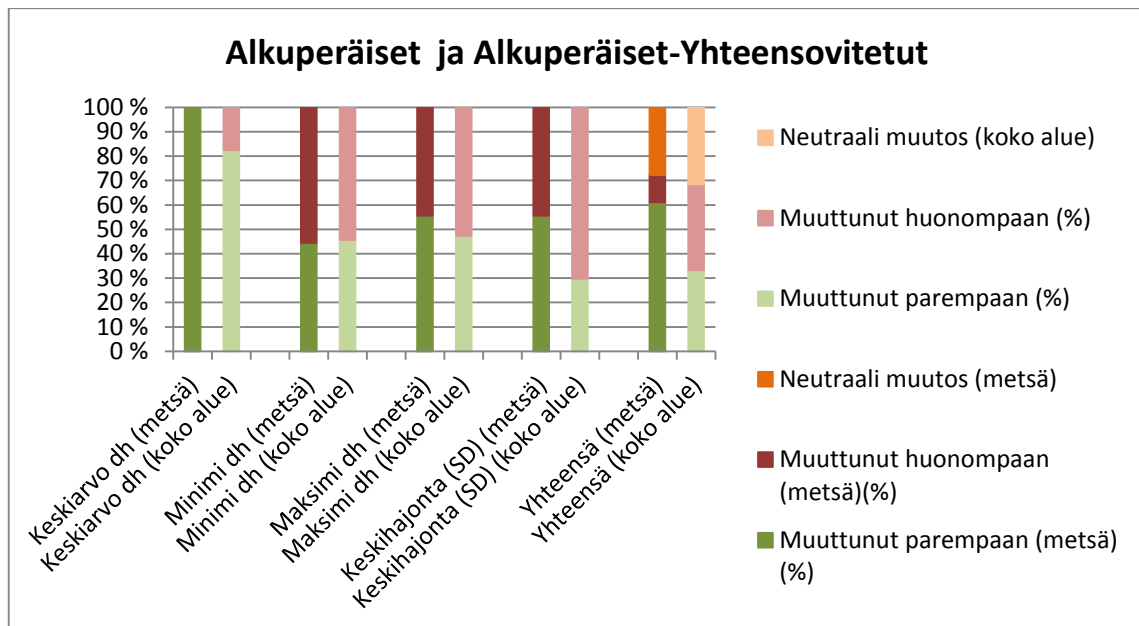
Koeaineiston alkuperäisten pistejoukkojen välisessä vertailussa koko alueen keskiarvokorkeusetäisyyttä huonommat pistejoukot sijaitsivat lähinnä metsäalueella (katso Liitteet). Lähimpänä toisiaan olevat pistejoukot sijaitsivat tyypillisesti tiealueella ja seinänvierustalla. Huonoimmat minimikorkeusetäisyydet (Taulukko 5) löytyivät metsäalueen lisäksi seinänvierustalta pistejoukoista 653–716 ja tiealueelta pistejoukoista 278–360 (katso Liitteet). Huonoimmat maksimikorkeuserot olivat laajemmalla alueella. Koko alueen keskiarvoa huonompia maksimikorkeusetäisyyksiä oli tiealueella muutamassa kohdassa, seinänvierustalla muutamassa kohdassa ja metsäalueella muutamassa kohdassa. Huonoimmat minimikorkeusetäisyys -8,83 m ja maksimikorkeusetäisyys 7,45 m löytyivät metsäalueelta

(Taulukko 5). Vastaavasti parhaimmat -0,05 m ja 0,03 m löytyivät tiealueelta. Huonoin keskihajonta 0,30 m oli seinänvierustalla. Sen lisäksi seinänvierustan pistejoukoilla 653–676 (katso Liitteet) ja metsäalueella oli huonoimpia keskihajontoja. Seinänvierustan huonoja keskihajontoja selittävät huonot minimikorkeusetäisyydet. Parhaimmat arvot jokaisessa muuttujassa olivat tiealueella. Tiealueen pistejoukot 1423–1424 (katso Liitteet) olivat koeaineiston alkuperäisistä pistetiedostoista keskiarvoisesti lähimpinä toisiaan korkeussuunnassa.



Kuvaaja 5. Vertailu 4, jossa vertailtiin koeaineiston alkuperäisiä paikallaan pysyneitä pistejoukkoja yhteensovituksessa käytettyihin pistejoukkoihin ennen yhteensovitusta. Kuvaajassa eri muuttujien väliset prosentuaaliset suhteet koko alueella ja metsäalueella

Metsäalueen keskiarvoiset arvot (Taulukko 5) olivat jokaisella muuttujalla koko alueen keskiarvoja huonompia. Koko aineistossa suurin osa pistejoukoista oli koko alueen keskiarvoja parempia kaikkia muuttujia tarkasteltaessa (Kuvaaja 5). Metsäalueella suurin osa pistejoukoista oli koko alueen keskiarvoja parempia minimikorkeusetäisyyksiä (61 %) ja maksimikorkeusetäisyyksiä (78 %) tarkasteltaessa. Keskiarvokorkeusetäisyyksien (78 %) ja keskihajonnan (89 %) kohdalla metsäalueen pistejoukot olivat tyypillisesti koko alueen keskiarvoja huonompia.



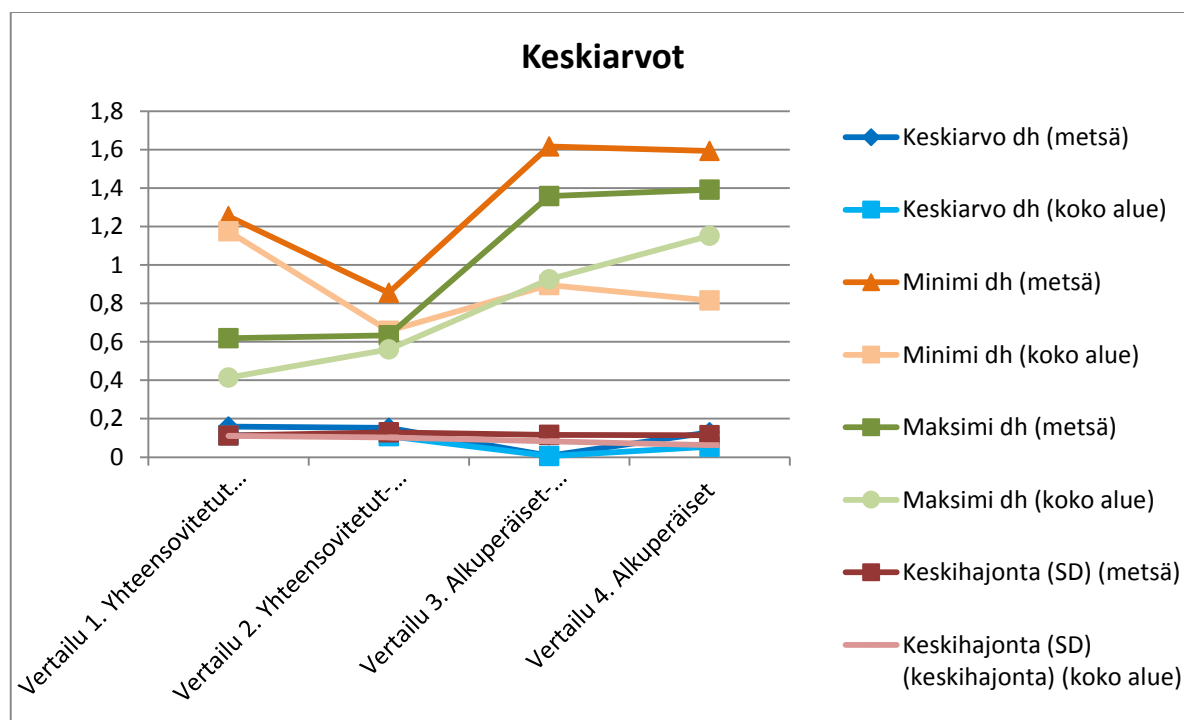
Kuvaaja 6. Kuvaajassa on esitetty vertailujen 4 ja 3 välinen yhteensovituksessa muodostunut ero. Taulukossa on eritelty paransiko yhteensovitus koeaineiston alkuperäisten pistetiedostojen välisiä etäisyyksiä

Kuvaajan vertailussa vähennettiin koeaineiston pistetiedostojen muuttujien itseisarvoista arvoista ennen yhteensovitusta yhteensovitetujen pistejoukkojen itseisarvot eli vertailujen 4 ja 3 etäisyydet toisistaan. Keskiarvokorkeusetäisyyksistä suurin osa muuttui yhteensovituksen jälkeen parempaan suuntaan eli keskiarvokorkeusetäisyydet parantuivat suurimmassa osassa pistejoukkoja (Kuvaaja 6 ja katso Liitteet). Korkeussuunnassa huonontuneiden keskiarvoetäisyyksien pistejoukot 40–192, 653 sekä 796–908 sijaitsivat tiealueella ja seinänvierustalla (katso Liitteet). Metsäalueella kaikkien pistejoukkojen keskiarvokorkeusetäisyydet parantuivat koeaineiston alkuperäisiin pistetiedostoihin nähden (Kuvaaja 6 ja katso Liitteet). Minimikorkeusetäisyyksiä tarkasteltaessa minimikorkeusetäisyydet huonontuivat yli puolissa pistejoukoista koko alueella (54 %) ja metsäalueella (56 %). Myös maksimikorkeusetäisyydet huonontuivat yli puolissa eli 53 % koko alueen pistejoukoista. Metsäalueella yli puolissa eli 56 % pistejoukoista maksimikorkeusetäisyydet päinvastoin parantuivat yhteensovituksen myötä. Metsäalueella myös keskihajonta parantui yli puolella eli 56 % pistejoukoista. Koko alueella keskihajonta huonontui 70 % pistejoukoista yhteensovituksen myötä (Kuvaaja 6 ja katso Liitteet).

Koeaineiston alkuperäisten välisen vertailun koko aineistoa tarkasteltaessa kolmanneksessa eli 33 % (Kuvaaja 6 ja katso Liitteet) pistejoukoista suurin osa arvoista parantui, kolmanneksessa eli 35 % pistejoukoista suurin osa muuttujista huonontui ja kolmanneksessa 32 % vastaavasti muuttujista puolet parantui ja puolet huonontui. Metsäalueella suurimmassa osassa eli 61 % pistejoukoista yhteensovitus paransi suurinta osaa muuttujista. Metsäalueella vain joka yhdeksännessä eli 11 % pistejoukoista suurin osa muuttujista huonontui yhteensovituksen myötä. Lähes kolmannekselle eli 28 % metsäalueen pistejoukoista yhteensovituksella oli yhtä paljon hyviä ja huonoja vaikutuksia.

Taulukko 6. Kaikkien korkeussuuntaisten vertailujen koko alueiden ja metsäalueiden keskiarvot jokaiselle korkeuseromuuttujalle

		Keskiarvo dh	Minimi dh	Maksimi dh	Keskihajonta (SD)
Vertailu 1. Yhteensovitetut ennen yhteensovitusta-Vertausaineisto	Keskiarvoinen etäisyys (m)	0,1145	1,1753	0,4133	0,1105
	Keskiarvoinen etäisyys (metsä) (m)	0,1592	1,2536	0,6196	0,1121
Vertailu 2. Yhteensovitetut-Vertausaineisto	Keskiarvoinen etäisyys (m)	0,1099	0,6566	0,5598	0,1025
	Keskiarvoinen etäisyys (metsä) (m)	0,1520	0,8556	0,6341	0,1287
Vertailu 3. Alkuperäiset-Yhteensovitetut	Keskiarvoinen etäisyys (m)	0,0063	0,8949	0,9247	0,0823
	Keskiarvoinen etäisyys (metsä) (m)	0,0080	1,6160	1,3589	0,1163
Vertailu 4. Alkuperäiset	Keskiarvoinen etäisyys (m)	0,0550	0,8145	1,1514	0,0625
	Keskiarvoinen etäisyys (metsä) (m)	0,1291	1,5931	1,3917	0,1138



Kuvaaja 7. Korkeussuuntaisten muuttujien arvot eri vertailuissa metsässä ja koko alueella

Kaikkien korkeussuuntaisten vertailujen välisistä keskiarvoista (Taulukko 6 ja Kuvaaja 7) koko alueen paras keskiarvokorkeusetäisyys 0,01 m löytyi vertailusta 3, jossa vertailtiin koeaineiston sisäisiä korkeuseroja yhteensovituksen jälkeen. Huonoin keskiarvokorkeusetäisyys 0,11 m löytyi koeaineiston ja vertausaineiston välisestä vertailusta 1 ennen yhteensovitusta. Metsäalueen keskiarvokorkeusetäisyydet sijoittuivat samalla tavalla. Vertausaineiston kanssa tehdyissä vertailuissa ei ollut juuri eroa ennen (0,11 m) ja jälkeen (0,11 m) yhteensovitusta (Taulukko 6). Molemmista vertausaineiston kanssa tehdyissä vertailuissa oli selkeästi huonompi keskiarvokorkeusetäisyys kuin pelkkien PLS-koeaineistojen sisäisissä vertailuissa.

Huonoin koko alueen minimikorkeusetäisyyksien keskiarvo 1,18 m (Taulukko 6 ja Kuvaaja 7) oli vertailussa 1. Toisaalta samasta vertailusta löytyi paras maksimikorkeusetäisyyksien keskiarvo 0,41 m. Huonoin maksimikorkeusetäisyyksien keskiarvo 1,15 m löytyi koeaineiston alkuperäisten sisäisestä vertailusta ja paras minimikorkeusetäisyyksien keskiarvo 0,66 m taas koeaineiston yhteensovitettujen ja vertausaineiston välisestä vertailusta 2. Huonoin keskihajontojen keskiarvo 0,11 m löytyi huonoimpien keskiarvokorkeusetäisyyksien ja minimikorkeusetäisyyksien keskiarvojen tavoin koeaineiston yhteensovitettujen ja vertausaineiston välisestä vertailusta ennen yhteensovitusta. Kaikissa vertailuissa metsäalueen keskiarvokorkeusetäisyyksien keskiarvot olivat huonompia kuin koko alueen keskiarvot. Samoin oli minimi- ja maksimikorkeusetäisyyksien sekä keskihajonnan keskiarvojen kohdalla (Taulukko 6).

#### 5.1.4 ICP-yhteensovituksen tulokset E-, N- ja h-suuntien sekä heading-kiertokulman vertailuista

Seuraavassa Taulukossa 7 on esitetty E- ja N-etäisyyksien sekä niiden välisten heading-kiertokulmien keskiarvoiset tulokset vertailuista 1–4 ja niiden välisistä vertailuista. Keskiarvoetäisyydet ovat kunkin vertailun pistejoukkojen keskiarvoisista etäisyyksistä otettu keskiarvo. Taulukoissa on esitetty myös kunkin vertailun pistejoukkojen väliset pienimmät ja suurimmat keskiarvoetäisyydet. E- ja N-suuntien sekä heading-kiertokulmien vertailut tehtiin manuaalisesti TerraScan-ohjelmalla. Taulukkoon on otettu mukaan myös Output Control Report -työkalulla saadut itseisarvoiset ellipsoidiset h-keskiarvokorkeuserot. Kaikkien kolmen suunnan ja heading-kiertokulman välinen tarkastelu oli tärkeää yhteensovituksen kokonaismuutoksen kannalta, koska yhteensovitus saattoi kiertää ja siirtää pistetiedostoja kaikkiin kolmeen suuntaan.



Taulukko 7. Taulukkoon on koottu E- ja N-keskiarvoetäisyyksien, niiden välisten heading-kiertokulmien ja h-keskiarvoetäisyyksien keskiarvot sekä suurimmat ja pienimmät keskiarvot. Keskiarvot on esitetty koko alueelta ja metsäalueelta erikseen

#### Keskiarvo dE

	Vertailu 1. Yhteensovitetut ennen yhteensovitusta - Vertausaineisto	Vertailu 2. Yhteensovitetut - Vertausaineisto	Vertailu 3. Alkuperäiset - Yhteensovitetut	Vertailu 4. Alkuperäiset
Keskiarvoetäisyys (m)	0,2620	0,2603	0,3023	0,0554
Pienin keskiarvoetäisyys (m)	0,0018	0,0092	0,0019	0,0031
Suurin keskiarvoetäisyys (m)	1,3363	1,2660	4,2809	0,4064

Keskiarvoetäisyys (metsä) (m)	0,0355	0,1245	0,1284	0,0835
Pienin keskiarvoetäisyys (metsä) (m)	0,0018	0,0092	0,0094	0,0131
Suurin keskiarvoetäisyys (metsä) (m)	0,1192	0,3548	0,4534	0,4064

#### Keskiarvo dN

	Vertailu 1. Yhteensovitetut ennen yhteensovitusta - Vertausaineisto	Vertailu 2. Yhteensovitetut - Vertausaineisto	Vertailu 3. Alkuperäiset - Yhteensovitetut	Vertailu 4. Alkuperäiset
Keskiarvoetäisyys (m)	0,1441	0,1384	0,1603	0,0534
Pienin keskiarvoetäisyys (m)	0,0055	0,0025	0,0004	0,0008
Suurin keskiarvoetäisyys (m)	0,4648	0,5202	2,6257	0,3483

Keskiarvoetäisyys (metsä) (m)	0,1314	0,1216	0,0821	0,1012
Pienin keskiarvoetäisyys (metsä) (m)	0,0504	0,0025	0,0120	0,0010
Suurin keskiarvoetäisyys (metsä) (m)	0,4648	0,5202	0,1984	0,3483

#### Keskiarvo dh

	Vertailu 1. Yhteensovitettujen yhteensovitusta-Vertausaineisto	Vertailu 2. Yhteensovitettujen Vertausaineisto	Vertailu 3. Alkuperäiset-Yhteensovitettut	Vertailu 4. Alkuperäiset
Keskiarvoetäisyys (m)	0,1145	0,1099	0,0063	0,0550
Pienin keskiarvoetäisyys (m)	0,0006	0,0010	0,0000	0,0001
Suurin keskiarvoetäisyys (m)	0,3011	0,4807	0,0381	0,5424

Keskiarvoetäisyys (metsä) (m)	0,1592	0,1520	0,0080	0,1291
Pienin keskiarvoetäisyys (metsä) (m)	0,1035	0,0163	0,0003	0,0017
Suurin keskiarvoetäisyys (metsä) (m)	0,3011	0,4807	0,0381	0,5424

#### Keskiarvo kiertokulma (heading)

	Vertailu 1. Yhteensovitettujen yhteensovitusta - Vertausaineisto	Vertailu 2. Yhteensovitettujen Vertausaineisto	Vertailu 3. Alkuperäiset - Yhteensovitettut	Vertailu 4. Alkuperäiset
Keskiarvo (°)	65,02	67,33	79,37	72,36
Pienin keskiarvo (°)	8,96	12,02	7,97	8,14
Suurin keskiarvo (°)	114,67	111,51	117,37	118,80

Keskiarvo (metsä) (°)	53,16	60,58	89,85	70,25
Pienin keskiarvo (metsä) (°)	9,65	14,78	61,86	8,14
Suurin keskiarvo (metsä) (°)	112,07	110,91	113,31	118,23

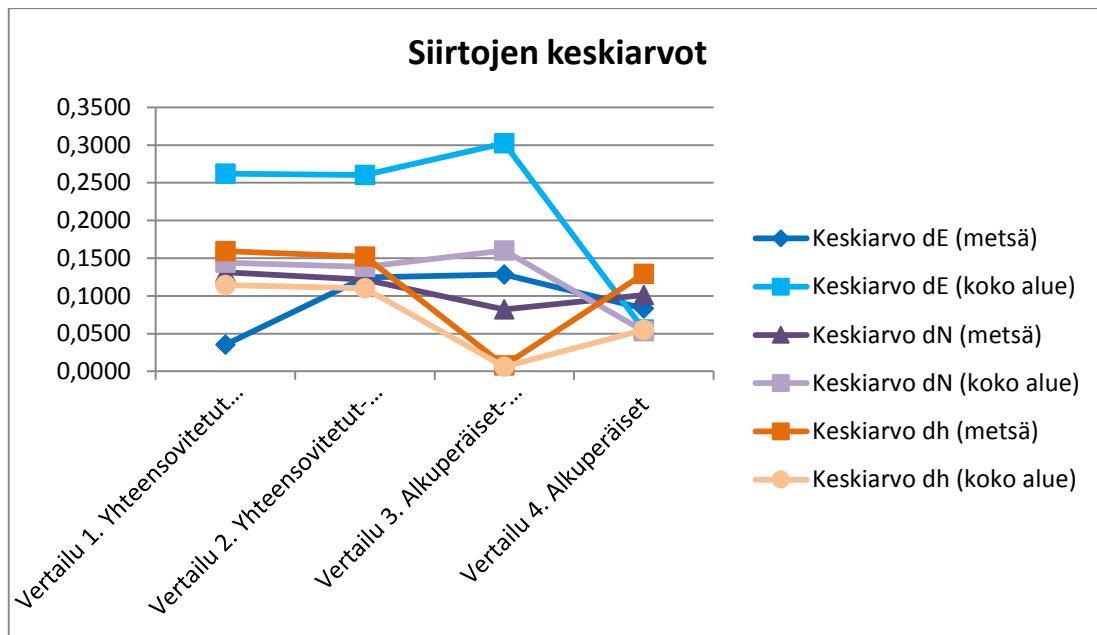
Koeaineiston yhteensovitettujen pistejoukkojen ja vertausaineiston välisessä vertailussa 1 ennen yhteensovitusta suurin eli huonoin koko alueen E-keskiarvoetäisyys 1,34 m (Taulukko 7 ja Kuvaaja 8) löytyi tiealueen pistejoukosta 151 (katso Liitteet). Koko alueen keskiarvoa huonommat E-keskiarvoetäisyydet löytyivät tyypillisesti tiealueelta. Myös koko alueen keskiarvoa huonommat N-keskiarvoetäisyydet löytyivät tiealueelta kahta metsäalueen pistejoukkoa lukuun ottamatta. Korkeussuunnassa koko alueen keskiarvoetäisyyttä huonommat pistejoukot olivat tyypillisesti metsäalueella, toisin kuin E- ja N-etäisyyksien keskiar-

vot. Koko alueen keskiarvoa huonommat heading-kiertokulmien keskiarvot jakaantuivat useisiin pistejoukkoihin ja alueille.

Koeaineiston yhteensovitetujen pistejoukkojen ja vertausaineiston välisessä vertailussa 2 koko alueen keskiarvoa huonompia E-keskiarvoetäisyyksiä löytyi etenkin tiealueelta (katso Liitteet). Metsäalueella lähes kaikki E-keskiarvoetäisyydet olivat koko alueen keskiarvoa parempia kahta pistejoukkoa lukuun ottamatta. Huonoin E-keskiarvoetäisyys 1,27 m löytyi tiealueen pistejoukosta 360 ja paras 0,01 m metsäalueen pistejoukosta 1420 (katso Liitteet). Metsäalueelta löytyivät myös paras 0,00 m ja huonoin 0,52 m N-keskiarvoetäisyys. Metsäalueella oli enemmän koko alueen keskiarvoja huonompia keskiarvoetäisyyksiä korkeussuunnassa ja heading-kiertokulmissa kuin E- tai N-suunnissa. Korkeussuuntaiset keskiarvoa huonommat keskiarvoetäisyydet sijoittuivat tiealueella tyypillisesti eri pistejoukkoihin kuin koko alueen keskiarvoja huonommat heading-kiertokulmakeškiarvot ja N-keskiarvoetäisyydet (katso Liitteet). Koko alueen keskiarvoa huonompia heading-kiertokulmien keskiarvoja oli paljon sekä tie- että metsäalueen pistejoukoissa.

Koeaineiston alkuperäisten ja yhteensovitetujen välisessä vertailussa 3 huonoimmat ja parhaimmat E- (4,28 m ja 0,00 m) ja N-etäisyyksien (2,63 m ja 0,00 m) keskiarvot löytyivät tiealueelta (katso Liitteet). Huonoimmat N-keskiarvoetäisyydet jakautuivat kohdullisen tasaisesti koko alueelle. E- ja N-suunnista poiketen koko alueen keskiarvoja huonompia korkeusetäisyyksien ja heading-kiertokulmien keskiarvoja oli paljon tiealueella. Huonoin korkeussuuntainen keskiarvoetäisyys 0,04 m löytyi kuitenkin metsäalueen pistejoukosta 1145. Korkeussuunnassa oli paljon (28 %) myös neutraaleja eli lähellä nollaa olevia keskiarvoetäisyyksiä (katso Liitteet). Suurimmassa osassa pistejoukoista eli 58 % heading-kiertokulman keskiarvo oli koko alueen keskiarvoa huonompi (katso Liitteet).

Koeaineiston alkuperäisten pistejoukkojen välisessä vertailussa 4 koko alueen keskiarvoa huonommat E-keskiarvoetäisyydet jakaantuivat tasaisesti eri pistejoukkoihin. Huonoin E-etäisyyksien keskiarvo 0,41 m löytyi metsäalueelta pistejoukosta 1145 (katso Liitteet). Myös huonoin N-etäisyyksien keskiarvo 0,35 m löytyi metsäalueelta pistejoukosta 1351 (katso Liitteet). Paras N-keskiarvoetäisyys 0,00 m oli seinänvierustalla pistejoukossa 961. Parhaimmat keskiarvokorkeusetäisyydet sijaitsivat tiealueella ja huonoimmat metsäalueella. Heading-kiertokulmissa keskiarvot menivät päinvastaisesti. Huonoin heading-kiertokulmien keskiarvo 118,80° löytyi tiealueelta ja paras 8,14° metsäalueelta.



Kuvaaja 8. Siirtojen keskiarvot eri vertailuissa metsässä ja koko alueella

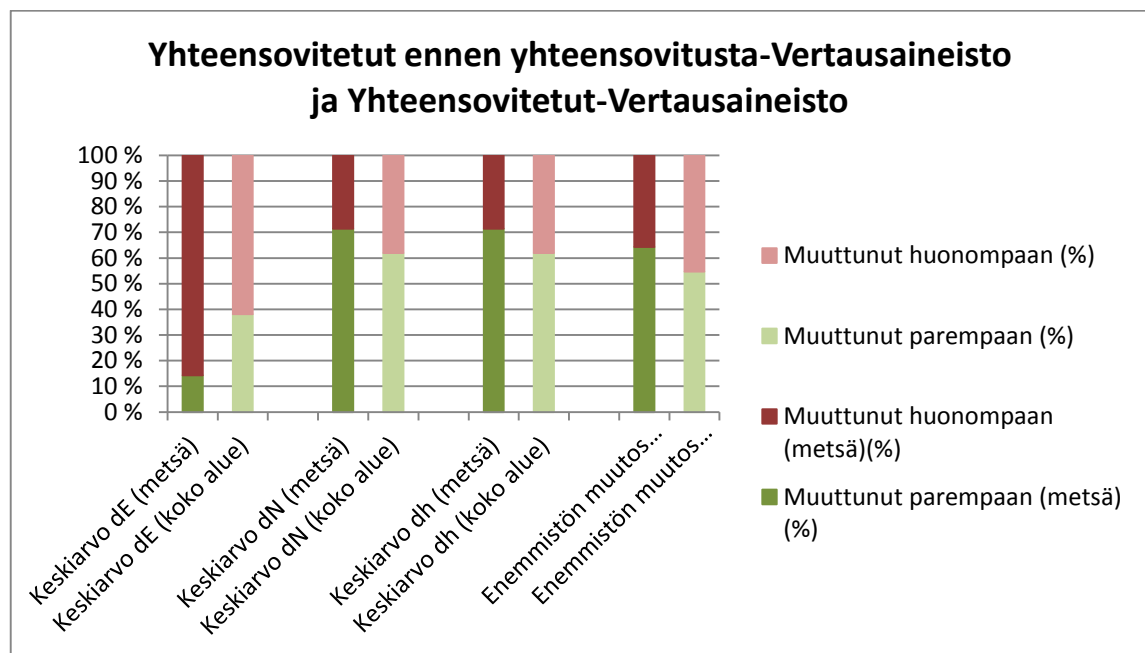
Paras vertailujen välinen E-keskiarvoetäisyyksien keskiarvo 0,06 m (Taulukko 7 ja Kuvaaja 8) löytyi koeaineiston alkuperäisten pistejoukkojen sisäisestä vertailusta 4. Huonoin E-keskiarvoetäisyyksien keskiarvo 0,30 m löytyi koeaineiston alkuperäisten pistejoukkojen väliltä yhteensovituksen jälkeen eli vertailusta 3. Samasta vertailusta löytyi myös huonoin vertailuista löytynyt E-keskiarvoetäisyys 4,28 m. Paras E-keskiarvoetäisyys 0,00 m löytyi koeaineiston yhteensovitetujen ja vertausaineiston välisestä vertailusta 1 ennen yhteensovitusta. Huonoin E-keskiarvoetäisyyksien keskiarvo 0,13 m löytyi samasta vertailusta 3 metsäalueella kuin koko alueellakin. Kaikissa vertailuissa E-keskiarvoetäisyyksien keskiarvo oli huonompi koko alueella kuin metsäalueella, koeaineiston alkuperäisiä pistejoukkoja (vertailu 4) lukuun ottamatta. Koeaineiston alkuperäisten pistejoukkojen välisessä vertailussa oli huonompi E-keskiarvoetäisyyksien keskiarvo 0,08 m metsäalueella kuin koko alueella (0,06 m).

N-suunnassa huonoin keskiarvoetäisyyksien keskiarvo vertailujen välillä (0,16 m) oli koeaineiston alkuperäisten ja yhteensovitetujen pistejoukkojen välillä eli vertailussa 3 (Taulukko 7 ja Kuvaaja 8). Koeaineiston alkuperäisten ja yhteensovitetujen välisessä vertailussa 3 oli myös suurin pistejoukkojen välinen hajonta. Paras N-keskiarvoetäisyyksien keskiarvo 0,05 m löytyi koeaineiston alkuperäisten pistejoukkojen väliltä ennen yhteensovitusta vertailusta 4. Myös N-suunnassa oli jokaisessa vertailussa parempi keskiarvoetäisyyksien keskiarvo metsäalueella kuin koko alueella. Ainoastaan koeaineiston alkuperäisten pistejoukkojen sisäisessä vertailussa 4 ero oli toisinpäin. Koeaineiston alkuperäisten pistejoukkojen välisessä vertailussa 4 N-keskiarvoetäisyyksien keskiarvo 0,10 m oli lähes kaksi kertaa huonompi metsäalueella kuin koko alueen keskiarvoetäisyyksien keskiarvo 0,05 m (Taulukko 7 ja Kuvaaja 8).

Ellipsoidisia korkeusetäisyyksiä tarkasteltaessa paras keskiarvoetäisyyksien keskiarvo (0,01 m) vertailujen välillä oli koeaineiston alkuperäisten ja yhteensovitetujen pistejoukkojen välisessä vertailussa 3 (Taulukko 7 ja Kuvaaja 8). Huonoin keskiarvokorkeusetäisyyksien keskiarvo 0,11 m oli vertausaineiston ja koeaineiston välillä ennen yhteensovitusta vertailussa 1. Kaikissa vertailuissa paras keskiarvokorkeusetäisyys

oli lähellä nollaa. Kaikissa vertailuissa metsäalueen keskiarvokorkeusetäisyyksien keskiarvot olivat koko aluetta huonompia. Huonoin metsäalueen keskiarvokorkeusetäisyyksien keskiarvo 0,16 m löytyi vertausaineiston ja koeaineiston väliltä ennen yhteensovitusta eli vertailusta 1 (Taulukko 7 ja Kuvaaja 8). Paras eli 0,01 m löytyi metsäalueella koeaineiston alkuperäisten ja yhteensovitettujen pistejoukkojen välisestä vertailusta 3. Kaikissa vertailuissa huonoin keskiarvokorkeusetäisyys löytyi metsäalueelta.

Huonoin heading-kiertokulmakeškiarvojen keskiarvo  $79,37^\circ$  (Taulukko 7) vertailujen väliltä löytyi koeaineiston alkuperäisten ja yhteensovitettujen välisestä vertailusta 3, kuten huonoimmat E- ja N-keskiarvoetäisyyksien keskiarvot. Paras keskiarvoinen heading-kiertokulmakeškiarvo  $65,02^\circ$  löytyi koeaineiston yhteensovitettujen ja vertausaineiston välisestä vertailusta 1 ennen yhteensovitusta. Kaikissa heading-kiertokulmien välisissä vertailuissa oli huono keskiarvoinen keskihajonta. Huonoimmat ( $89,85^\circ$ ) ja parhaimmat ( $53,16^\circ$ ) keskiarvoiset heading-kiertokulmakeškiarvot löytyivät samoista vertailuista metsäalueella kuin koko alueellakin. Metsäalueen keskiarvoiset heading-kiertokulmakeškiarvot olivat kaikissa vertailuissa parempia lukuun ottamatta koeaineiston alkuperäisten ja yhteensovitettujen välistä vertailua 3. Siinä heading-kiertokulmakeškiarvo oli huonompi metsäalueella ( $89,85^\circ$ ) kuin koko alueella ( $79,37^\circ$ ) (Taulukko 7).

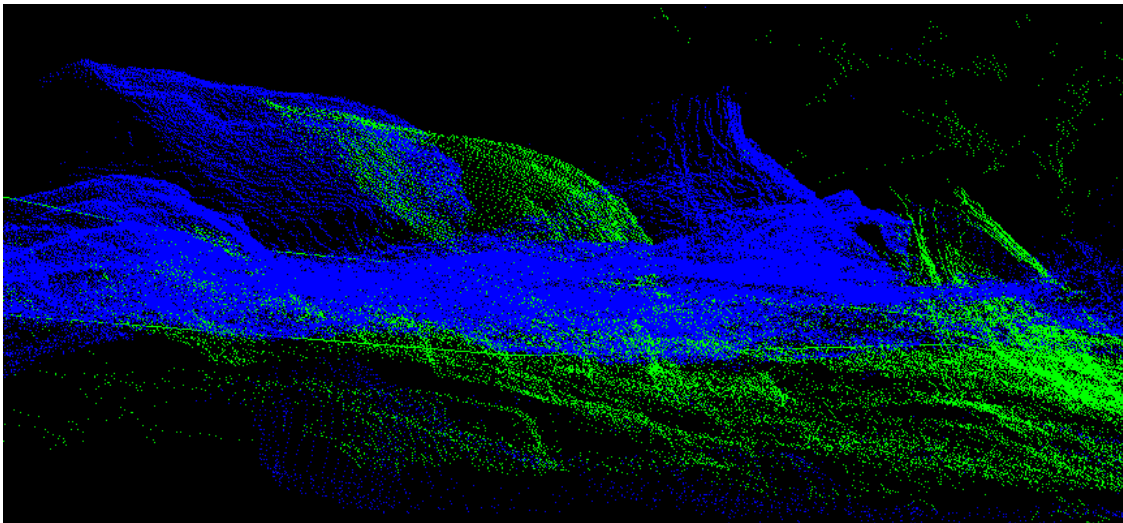


Kuvaaja 9. Kuvaajassa on esitetty yhteensovituksen vaikutus yksittäisiin pistejoukkoihin vertaus- ja koeaineiston välillä

Vertausaineiston kanssa tehdyissä vertailuissa (katso Liitteet ja Kuvaaja 9) yhteensovitus vaikutti E-suunnassa suurimpaan osaan pistejoukoista eli 62 % negatiivisesti. E-muutos oli suhteellisesti huonompi (86 %) metsäalueella kuin koko alueella (62 %). Metsä- ja koko alueella yhteensovituksen vaikutus N- ja korkeussuuntaan sekä heading-kiertokulmaan oli suurimmassa osassa pistejoukkoja positiivinen. Metsäalueella N- ja korkeussuuntainen sekä heading-kiertokulman parannus oli muuta aluetta suhteessa selkeämpi. Enemmistön muutokseen ilman heading-kiertokulmaa merkittiin muutos sen mukaan, kumpaa enem-

mistö keskiarvoisista E-, N- ja korkeusetäisyysmuuttujista eli siirroista edusti. Sitä tarkasteltaessa yhteensovituksen paransi eli siirsi koeaineiston pistejoukkoja lähemmäs vertausaineistoja sekä koko alueella (55 %) että metsäalueella (64 %). Parannus oli suhteessa suurempaa metsäalueella kuin koko alueella.

Enemmistön muutosta tarkasteltiin myös siirtojen ja heading-kiertokulman kanssa (katso Liitteet). Tällöin muutos merkittiin neutraaliksi, jos kumpaakin muutossuuntaa oli yhtä paljon. Enemmistön muutosta tarkasteltaessa siirtojen ja heading-kiertokulman kanssa havaittiin, että noin kolmannekseen pistejoukoista vaikutus oli neutraali koko alueella (33 %) ja metsäalueella (36 %). Molemmilla alueilla yhteensovitus paransi 43 % pistejoukoista. Yhteensovitus huononsi 24 % koko alueen ja 21 % metsäalueen pistejoukoista (katso Liitteet).



Kuva 12. Kuvankaappaus TerraScan-ohjelmasta. Kuvassa näkyy koeaineiston yhteensovitettu pistejoukko 1303 sinisellä värillä ja vertausaineiston vastaava pistejoukko vihreällä värillä

Kuvassa 12 näkyy koeaineiston metsäalueen pistejoukko 1303 yhteensovituksen jälkeen. Pistejoukko 1303 siirtyi yhteensovituksen myötä korkeusetäisyysuunnassa 0,12 m ja N-etäisyysuunnassa 0,25 m lähemmäs vertausaineistoa (katso Liitteet). Samalla pistejoukko siirtyi E-etäisyysuunnassa 0,07 m kauemmas vertausaineistosta.



Kuvaaja 10. Kuvaajassa on esitetty yhteensovituksen vaikutus koeaineiston alkuperäisten yksittäisten pistejoukkojen sisäiseen vertailuun

Koeaineiston alkuperäisten pistejoukkojen välillä yhteensovitus (katso Liitteet ja Kuvaaja 10) huononsi suurimmassa osassa pistejoukkoja niiden välistä E- (79 %) ja N-keskiarvoetäisyyttä (70 %) koko alueella. E- ja N-suuntien vuoksi yhteensovitus huononsi suurinta osaa eli 68 % pistejoukoista, kun tarkasteltiin kaikkia siirtoja yhdessä. Kokonaisuudessaan kauemmas siirtyneiden suhteellinen määrä oli pienempi metsäalueella (44 %) kuin koko alueella (68 %), kun tarkasteltiin kaikkia siirtoja yhdessä. Parantuneiden suhteellinen määrä oli kaikissa muuttujissa suurempi metsäalueella kuin koko alueella lukuun ottamatta keskiarvoista heading-kiertokulmaa. Keskiarvokorkeusetäisyyden suunnassa kaikki pistejoukot parantuivat metsäalueella. Siksi kaikkia siirtoja yhdessä tarkasteltaessa yhteensovitus vei metsäalueella 56 % pistejoukoista lähemmäs toisiaan. Koko alueella yhteensovitus siirsi 68 % pistejoukoista kauemmas toisistaan, vaikka koko alueellakin 84 % pistejoukoista parantui keskiarvokorkeusetäisyyden suunnassa yhteensovituksen myötä (Kuvaaja 10 ja katso Liitteet).

Taulukko 8. Taulukossa on esitetty yhteensovituksen jälkeinen numeerinen etäisyyksien muutos kummassakin vertailussa

Yhteensovitettut ennen yhteensovitusta-Vertausaineisto ja Yhteensovitettut-Vertausaineisto	Keskiarvo dE (m)	Keskiarvo dN (m)	Keskiarvo dh (m)	Kiertokulma (heading) (°)
Parantuneiden keskiarvoinen muutos	0,4223	0,0880	0,0445	33,06
Huonontuneiden keskiarvoinen muutos	-0,2571	-0,1281	-0,0602	-41,15
Kaikkien keskiarvoinen muutos	0,0017	0,0057	0,0046	-2,31

Parantuneiden keskiarvoinen muutos (metsä)	0,0193	0,0781	0,0875	24,38
Huonontuneiden keskiarvoinen muutos (metsä)	-0,1070	-0,1607	-0,1933	-64,62
Kaikkien keskiarvoinen muutos (metsä)	-0,0889	0,0099	0,0073	-7,41

Alkuperäiset ja Alkuperäiset-Yhteensovitettut	Keskiarvo dE (m)	Keskiarvo dN (m)	Keskiarvo dh (m)	Kiertokulma (heading) (°)
Parantuneiden keskiarvoinen muutos	0,0787	0,0613	0,0590	23,93
Huonontuneiden keskiarvoinen muutos	-0,3338	-0,1784	-0,0065	-34,86
Kaikkien keskiarvoinen muutos	-0,2470	-0,1069	0,0486	-7,01

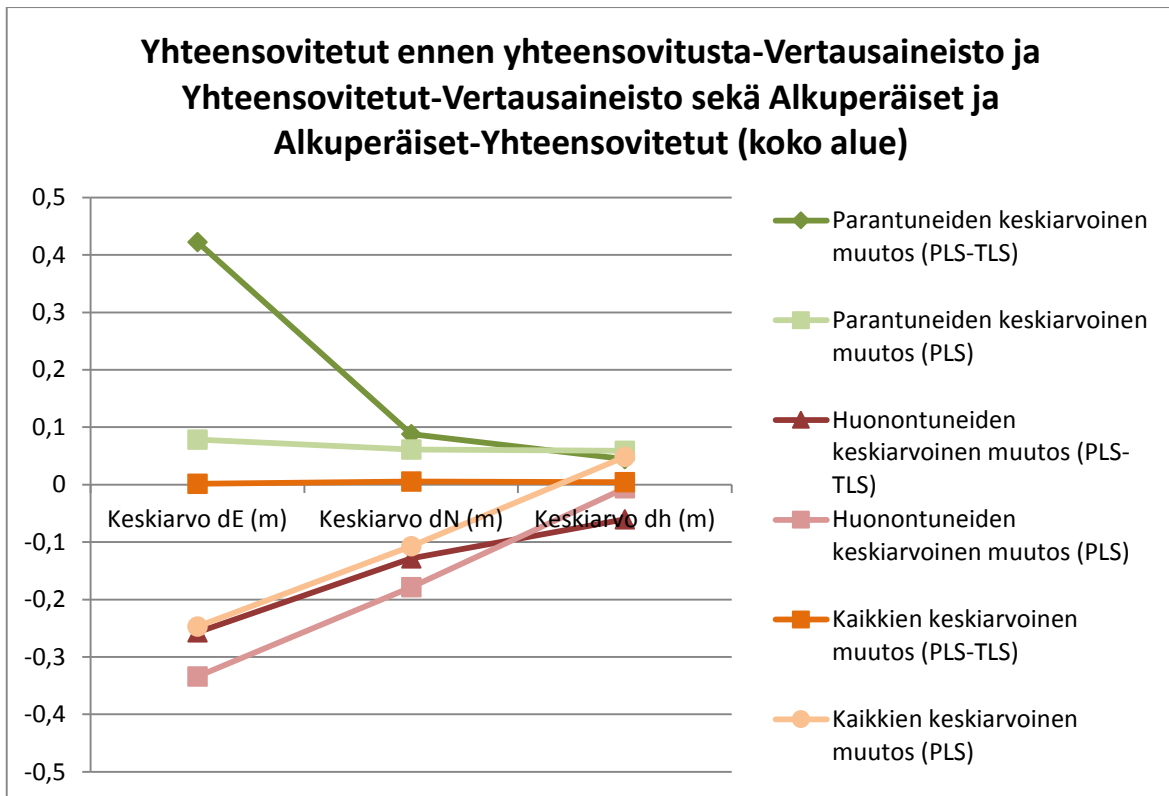
Parantuneiden keskiarvoinen muutos (metsä)	0,1030	0,0998	0,1211	18,52
Huonontuneiden keskiarvoinen muutos (metsä)	-0,1188	-0,0614	0,0000	-43,86
Kaikkien keskiarvoinen muutos (metsä)	-0,0449	0,0192	0,1211	-19,60

Yhteensovituksen aiheuttama parantuneiden pistejoukkojen E-, N-keskiarvoetäisyyksien keskiarvoinen parannus koko alueella (Taulukko 8) oli suurempi koeaineiston ja vertausaineiston välillä (0,42 m ja 0,09 m) kuin koeaineiston alkuperäisten pistejoukkojen keskinäisessä vertailussa (0,08 m ja 0,06 m). Vastaavasti huonontuneiden pistejoukkojen E- ja N-keskiarvoetäisyyksien keskiarvoinen huonontuminen koko alueella oli pienempää koeaineiston ja vertausaineiston välillä (0,26 m ja 0,13) kuin koeaineiston alkuperäisten pistejoukkojen keskinäisessä vertailussa (0,33 m ja 0,18 m). Korkeussuunnassa suhteet olivat toisinpäin. Alkuperäisen koeaineiston parantuneiden pistejoukkojen sisäinen keskiarvoinen muutos keskiarvokorkeusetäisyyden suunnassa (0,06 m) koko alueella oli yhteensovituksen myötä suurempi kuin vertausaineistoon nähden (0,04 m). Vastaavasti koeaineiston alkuperäiset huonontuneet pistejoukot huonontuivat keskiarvokorkeusetäisyyden suunnassa keskiarvoiltaan vähemmän (0,01 m) keskinäisessä vertailussa kuin vertausaineistoon nähden (0,06 m). Keskiarvoisissa heading-kiertokulmissa parantuneet pistejoukot parantuivat (33,06°) ja huonontuneet huonontuivat (41,15°) keskiarvoiltaan koko alueella enemmän vertausaineiston kanssa tehdyssä vertailussa kuin koeaineiston keskinäisessä vertailussa (23,93° ja 34,86°).

Metsäalueella parantuneiden pistejoukkojen vertailujen suhteet menivät osittain toisinpäin (Taulukko 8). Metsäalueella kaikki parantuneet siirrot N, E ja h parantuivat enemmän koeaineiston alkuperäisten sisäisissä yhteensovituksissa (0,10 m, 0,10 m ja 0,12 m) kuin ver-

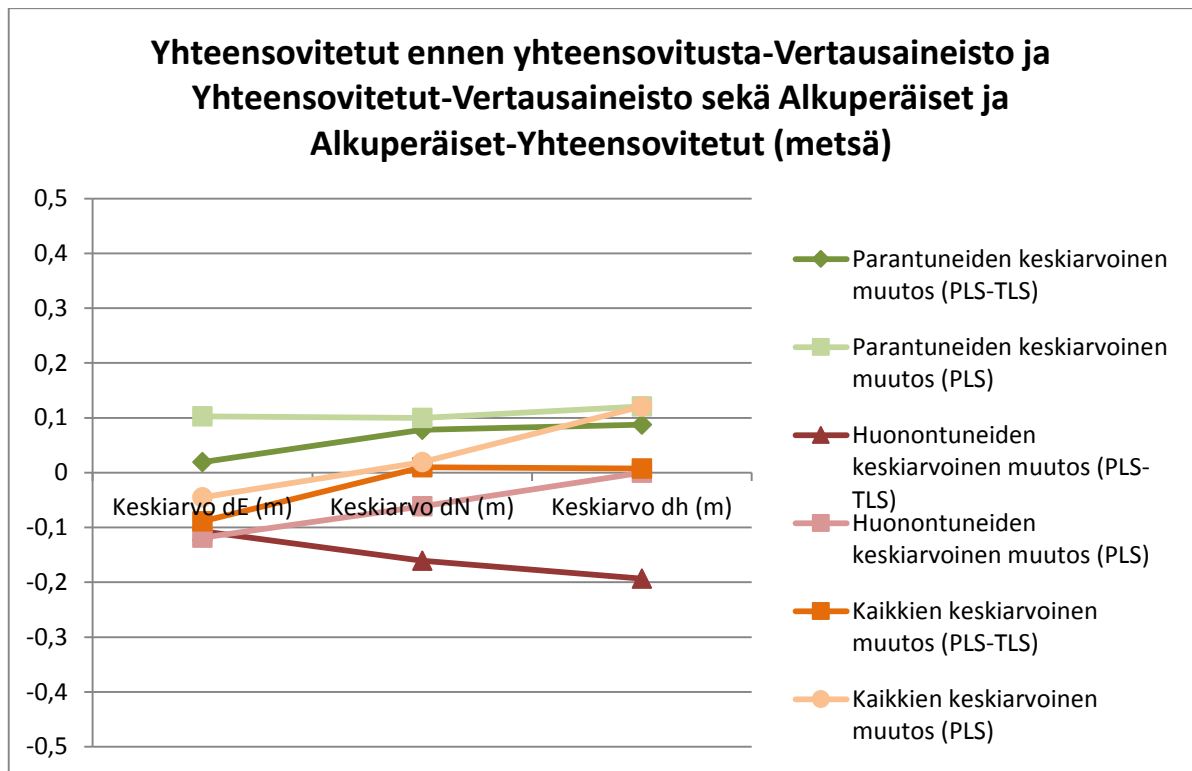


tausaineistoon nähden (0,02 m, 0,08 m ja 0,09 m). Keskiarvoisissa heading-kiertokulmissa taas metsäalueen parantuneiden pistejoukkojen keskiarvoinen parannus oli suurempi koeaineiston ja vertausaineiston (24,38°) välillä kuin koeaineiston alkuperäisten parantuneiden pistejoukkojen keskinäinen keskiarvoinen muutos (18,52°). Metsäalueella E-suuntainen keskiarvoetäisyys huonontui keskiarvoltaan enemmän koeaineiston alkuperäisten huonontuneiden pistejoukkojen välillä (0,12 m) kuin koeaineiston ja vertausaineiston välillä (0,11 m). Muissa metsäalueen muuttujissa huonontuneet keskiarvot huonontuivat keskiarvoiltaan enemmän koeaineiston ja vertausaineiston välillä kuin koeaineistojen alkuperäisten pistejoukkojen välillä.



Kuvaaja 11. Kuvaajassa on esitetty parantuneiden ja huonontuneiden pistejoukkojen sekä keskiarvoinen muutos yhteensovituksen myötä siirroilla koko alueella

Koeaineiston ja vertausaineiston välillä suurin keskiarvoinen parantuneiden pistejoukkojen keskiarvoetäisyyksien parannus siirroissa (0,42 m) yhteensovituksen myötä koko alueella tapahtui E-suunnassa (Taulukko 8 ja Kuvaaja 11). Keskiarvoltaan pienin parantuneiden pistejoukkojen keskiarvoetäisyyksien parannus samassa vertailussa (0,04 m) tapahtui korkeussuunnassa. Vastaavasti menivät suurimmat huonontumiset. E-suunnan huonontuneiden pistejoukkojen keskiarvoetäisyyksien keskiarvoinen huonontuminen 0,26 m oli yli neljä kertaa korkeussuuntaista huonontuneiden pistejoukkojen keskiarvoetäisyyksien keskiarvoista huonontumista 0,06 m suurempi. Metsäalueella vertailun siirtojen väliset suhteet menivät toisinpäin. Suurimmat parantuneiden pistejoukkojen keskiarvoetäisyyksien keskiarvojen parannus 0,09 m ja huonontuneiden pistejoukkojen keskiarvoetäisyyksien huonontuminen 0,19 m koeaineiston ja vertausaineiston välillä tapahtuivat korkeussuunnassa ja pienimmät parantuminen 0,02 m sekä huonontuminen 0,11 m E-suunnassa (Taulukko 8 ja Kuvaaja 12).



Kuvaaja 12. Kuvaajassa on esitetty parantuneiden ja huonontuneiden pistejoukkojen sekä keskiarvoinen muutos yhteensovituksen myötä siirroilla metsäalueella

Koeaineiston alkuperäisten pistejoukkojen välisessä vertailussa (Taulukko 8 ja Kuvaaja 11) keskiarvoisten siirtojen keskinäiset suhteet olivat koko alueella samalla tavalla kuin vertausaineiston tuloksissa. Metsäalueella keskiarvoltaan pienin parantuneiden pistejoukkojen keskiarvoetäisyyksien keskiarvoinen parannus 0,10 m (Taulukko 8 ja Kuvaaja 12) tapahtui N-suunnassa ja suurin 0,12 m korkeussuunnassa. Keskiarvoltaan suurin huonontuneiden pistejoukkojen keskiarvoetäisyyksien huonontuminen 0,12 m tapahtui E-suunnassa ja pienin korkeussuunnassa, jossa huonontuneita pistejoukkoja ei ollut lainkaan. Heading-kiertokulmissa kummassakin vertailussa parantuneiden pistejoukkojen keskiarvojen parannus oli keskiarvoltaan suurempi koko alueella ja huonontuneiden pistejoukkojen keskiarvojen huonontuminen keskiarvoltaan suurempi metsäalueella.

Koeaineiston ja vertausaineiston välillä suurin keskiarvoetäisyyksien parannus 0,01 m (Taulukko 8 ja Kuvaaja 11) tapahtui N-suunnassa. Kaikki siirrot parantuivat, vaikka heading-kiertokulma huonontuikin keskiarvoltaan  $2,13^\circ$  yhteensovituksen myötä. Myös metsäalueella N-suuntainen keskiarvoinen parannus 0,01 m (Taulukko 8 ja Kuvaaja 12) oli keskiarvoetäisyyksien parannuksista suurin. Metsäalueella keskiarvoinen E-suunta huonontui keskiarvoltaan 0,09 m ja heading-kiertokulma huonontui keskiarvoltaan  $7,41^\circ$  vertausaineistoon nähden. Koeaineiston alkuperäisten pistejoukkojen keskiarvoetäisyyksien välillä korkeussuunta parantui keskiarvoisesti eniten eli 0,05 m (Taulukko 8 ja Kuvaaja 11). Muut keskiarvoiset siirrot ja kierrot huonontuivat keskiarvoiltaan. Myös metsäalueella korkeussuuntainen keskiarvoetäisyyksien parantuminen 0,12 m (Taulukko 8 ja Kuvaaja 12) oli keskiarvoltaan suurin, vaikka myös N-suunnassa tapahtui keskiarvossa parannusta 0,02 m. Keskiarvoinen E-suunta ja keskiarvoinen heading-kiertokulma huonontuivat keskiarvoiltaan myös metsäalueella koko alueen tavoin.

## 5.2 Tulosten tarkastelu

Tuloksiin saattoi vaikuttaa vertailumenetelmän lisäksi se seikka, että joiltakin alueilta oli saatavilla huonommin vertausaineistoa kuin PLS-koeaineistoa. Vertausmenetelmä oli huono, koska jokaiselta pistejoukolta mitattiin vain neljä E- ja N-etäisyyttä manuaalisesti. TLS-vertausaineisto ei kattanut kaikkia yksittäisiä PLS-pistejoukkoja riittävän hyvin, vaikka vertausaineisto oli alueelliselta pinta-alaltaan kattavampi. TLS-vertausaineisto kattoi huonosti lähinnä tiealueen. Seinänvierustalta ei ollut saatavilla vertausaineistoa lainkaan. Koetyöalueen metsässä tehtiin lisää TLS-keilauksia, joten metsäalueen vertausaineisto oli keskimääräistä parempaa vertausmielessä.

Vertausaineiston haasteena oli huono maanpinnan näkyminen. TLS-keilaimella mitattiin PLS-keilaimen tavoin hieman maanpinnan yläpuolelta. Vertausaineistossa oli paikoin vain vähän maanpintaa, koska puut estivät takanaan olleen maanpinnan näkymisen paikallaan olleelle TLS-keilaimelle. TLS-vertausaineistossa oli kuitenkin enemmän maanpintaa kuin ALS-aineistossa olisi ollut. Vertausaineisto mitattiin usealla eri mittauskerralla. TLS-mittausten välillä saattoi tapahtua muutoksia, erityisesti kasvillisuudessa, joten vertausaineisto ei ollut myöskään välttämättä tasalaatuista maanpinnan irrotuksen kannalta.

ICP-menetelmä käytti yhteensovituksessaan kerrallaan aina kahden eri aineiston maanpintaa. Maanpintaluokittelussa maanpintaan saattoi jäädä puita tai muita maanpinnan yläpuolella olevia kohteita. Yhteensovituksessa tällaiset kohteet tulivat mukaan maanpintana. Yhteensovituksen lopputulokseksi saattoi siis tulla maanpinnan ja yläpuolisen kohteen välinen kompromissi, joka ei vastannut tällöin todellista maanpintaa. Kuvissa 10, 11 ja 12 näkyy pistejoukossa 1303 kiven oikealla puolella puunrunkoa. Maanpintaluokittelun tulisi olla vielä tarkempaa, jotta todelliset maanpinnat saataisiin sovitettua yhteen mahdollisimman hyvin. Yhteensovituksessa olisi voinut jättää myös huomioimatta kokonaan liian kaukana toisistaan olevat pisteet. Tällöin esimerkiksi puut eivät olisi yhdistyneet maanpintaan. Toisaalta pisteiden poisjättämisessä olisi ollut myös omat ongelmansa. Kohteet eivät olisi sovituneet yhteen välttämättä ollenkaan, jos aineistot olisivat jo alussa olleet yli kynnysetäisyyden päässä toisistaan.

Yhteensovituksessa käytettiin kaikkia pistejoukkojen pisteitä. Jokaista pistettä käyttämällä hyödynnettiin kaikkea saatavilla olevaa tietoa. Toisaalta laskenta olisi toteutettu nopeammin käyttämällä vain osaa pisteistä. Käytetyt pisteet olisi voitu valita aineistosta satunnaisesti. Valituilla pisteillä olisi ollut kuitenkin enemmän painoarvoa kuin valitsematta jääneillä pisteillä. Kaikkia pisteitä käytettäessä kullakin pisteellä oli keskenään suunnilleen yhtä suuri painoarvo. PLS-pistejoukkoja olisi voinut olla tutkimuksessa useampia, vaikka käytetyt 57 pistejoukkoa kattoivat laajasti erilaisia maastotyyppejä.

Referenssipistejoukon valinta vaikutti lopputulokseen. Paikallaan pysyvä referenssipistejoukko ei liikkunut yhteensovituksen aikana, vaan oli tällöin yhteensovituksessa oletuksena sijainnillisesti oikeampi pistejoukko. Liikuteltava pistejoukko siirtyi ja kiertyi iteraatiokierosten aikana suhteessa referenssipistejoukkoon. Jos liikuteltava pistejoukko oli pistejoukoista lähempänä todellista pisteiden sijaintia, niin pisteiden sijaintivirhe saattoi kasvaa yhteensovituksen aikana. Yhteensovituksen pistejoukkojen keskinäistä suhdetta valittaessa ei ollut vielä mahdollista tietää, kumpi pistejoukko oli lähempänä pisteiden todellista sijaintia. Eri pistejoukkojen yhteensovituksista saatuja virheitä pitäisi tarkastella kokonaisuutena, jotka jaetaan suuremman pisteaineiston virheeksi. Lisäksi trajektorin laskennasta saatavan tarkkuusestimaatin hyödyntäminen osana yhteensovitusta voisi olla hyödyllistä.

Keskiarvoista keskiarvokorkeusetäisyyden suuntaa tarkasteltaessa (Taulukko 7) metsä oli kaikissa vertailuissa ja muuttujissa huonompi kuin koko alue. Vertailujen väliltä huonoin keskiarvoinen keskiarvokorkeusetäisyys 0,11 m koko alueella löytyi koeaineiston alkuperäisten pistejoukkojen ja vertausaineiston välisestä vertailusta 1 ennen yhteensovitusta. Paras keskiarvoinen keskiarvokorkeusetäisyys eli 0,01 m (Taulukko 7) löytyi koeaineiston alkuperäisten pistejoukkojen keskinäisestä vertailusta 3 yhteensovituksen jälkeen. Metsäalueella keskiarvoisten keskiarvokorkeusetäisyyksien väliset suhteet olivat samalla tavalla.

Yhteensovitus paransi koko alueella korkeussuunnassa 62 % pistejoukossa (Kuvaaja 9 ja Liitteet) koeaineiston ja vertausaineiston välistä eroa eli siirsi pistejoukkoja lähemmäs toisiaan. Metsäalueella parantuneita pistejoukkoja oli suhteellisesti vielä enemmän eli 71 % metsäalueen pistejoukoista siirtyi lähemmäs vertausaineistoa yhteensovituksen myötä. Koeaineiston alkuperäisten pistejoukkojen välisessä sisäisessä vertailussa (Kuvaaja 10 ja Liitteet) korkeussuuntaista parannusta tapahtui vielä useamman pistejoukon välillä. Koko alueella 84 % koeaineiston pistejoukoista siirtyi korkeussuunnassa lähemmäs toista koeaineiston pistejoukkoa yhteensovituksen myötä. Metsäalueella kaikki pistejoukot parantuivat korkeussuunnassa.

E- ja N-suuntia sekä heading-kiertokulmia tarkasteltaessa (Taulukko 7) luvut näyttivät hieman erilaisilta. Jokaisessa vertailussa keskiarvoiset E- ja N-etäisyydet ja heading-kiertokulmat olivat keskiarvoltaan tyypillisesti huonompia koko alueella kuin metsäalueella. Ainoat poikkeukset E- ja N-suunnissa olivat koeaineiston alkuperäisten pistejoukkojen keskinäinen vertailu 4, jossa metsäalueella olivat keskiarvoltaan huonommat E- ja N-keskiarvoetäisyydet kuin koko alueella. Keskiarvoisissa heading-kiertokulmissa poikkeuksena oli koeaineiston alkuperäisten pistejoukkojen keskinäinen vertailu 3 yhteensovituksen jälkeen. Keskiarvoisen N-keskiarvoetäisyyden (0,16 m) tavoin koko alueen huonoin keskiarvoinen E-keskiarvoetäisyys (0,30 m) ja heading-kiertokulmien keskiarvo ( $79,37^\circ$ ) löytyivät koeaineiston alkuperäisten pistejoukkojen sisäisestä vertailusta 3 yhteensovituksen jälkeen.

Huonoin keskiarvoinen N-keskiarvoetäisyys metsäalueella 0,13 m (Taulukko 7) löytyi samasta vertailusta kuin keskiarvoltaan huonoin korkeussuuntainen keskiarvoetäisyys eli koeaineiston ja vertausaineiston välisestä vertailusta 1 ennen yhteensovitusta. Keskiarvoiltaan huonoimmat metsäalueen E-keskiarvoetäisyydet (0,13 m) ja keskiarvoinen heading-kiertokulma ( $89,85^\circ$ ) löytyivät samasta vertailusta 3 metsäalueella kuin koko alueellakin eli koeaineiston alkuperäisten pistejoukkojen keskinäisestä vertailusta yhteensovituksen jälkeen. Samasta vertailusta löytyi selkeästi keskiarvoltaan paras korkeussuuntainen keskiarvoetäisyys 0,01 m koko alueelta ja 0,01 m metsäalueelta.

Koe- ja vertausaineiston välisessä vertailussa (Kuvaaja 9 ja Liitteet) E-suunnassa koko alueella hieman yli puolet (62 %) pistejoukoista huonontui yhteensovituksen myötä. N- ja korkeussuunnassa siirtyi saman verran pistejoukkoja parempaan suuntaan. Kaikkia kolmea siirtoa tarkasteltaessa suurempi osa pistejoukoista (55 %) siirtyi parempaan suuntaan yhteensovituksen myötä, koska keskiarvokorkeusetäisyys ja N-keskiarvoetäisyys siirtyivät useassa pistejoukossa kokonaisuudessaan parempaan suuntaan. Kaikkia kolmea siirtoa tarkasteltaessa pistejoukko siirtyi parempaan suuntaan, jos kaksi kolmesta muuttujasta parantui yhteensovituksen myötä. Metsäalueella pistejoukkojen väliset suhteet jakautuivat suunnilleen samalla tavalla. Suhteessa suurempi määrä eli 64 % pistejoukoista siirtyi parempaan suuntaan metsäalueella kuin koko alueella (55 %), kun tarkasteltiin kaikkia kolmea siirtoa yhdessä.

Keskiarvoinen heading-kiertokulma siirtyi koko alueella (52 %) ja metsäalueella (64 %) yli puolessa pistejoukoista parempaan suuntaan koeaineiston ja vertausaineiston välillä yhteensovituksen myötä (katso Liitteet). Siirtoja ja heading-kiertokulmia tarkasteltiin myös yhdessä. Kaikkia muuttujia yhdessä tarkasteltaessa pistejoukko siirtyi parempaan suuntaan, jos kolme neljästä keskiarvoisesta muuttujasta parantui keskiarvoltaan yhteensovituksen myötä. Jos muuttujista yhtä moni siirtyi keskiarvoltaan parempaan ja huonompaan suuntaan, niin muutos merkittiin neutraaliksi. Tällaisia neutraaleja pistejoukkoja oli koko alueella 33 % ja metsäalueella 36 %. Keskiarvoltaan parempaan suuntaan siirtyneitä oli enemmistö eli 43 % kummallakin alueella. Keskiarvoltaan huonompaan suuntaan siirtyneitä oli koko alueella 24 % ja metsäalueella 21 %.

Koeaineiston pistejoukkojen sisäisessä vertailussa (Kuvaaja 10 ja Liitteet) sekä E- ja N-suuntien että heading-kiertokulmien suhteen pistejoukot siirtyivät tyypillisesti keskiarvoltaan huonompaan suuntaan koko alueella. Suurin osa pistejoukoista siirtyi keskiarvoltaan huonompaan E- ja N-suuntaan, vaikka korkeussuunnassa keskiarvoetäisyys oli täysin päinvastainen. Siksi koeaineiston alkuperäisten pistejoukkojen välisessä vertailussa kaikkia siirtoja tarkasteltaessa koko alueella yhteensovitus heikensi keskiarvoltaan tulosta 68 % pistejoukossa. Metsäalueella koeaineiston alkuperäisten pistejoukkojen keskinäisen vertailun tulos oli keskiarvoltaan hieman parempi. Korkeussuunnassa metsäalueella kaikki pistejoukot ja tasan puolet N-suunnan pistejoukoista siirtyi keskiarvoltaan parempaan suuntaan. Siksi metsäalueella kaikkia kolmea siirtoa yhdessä tarkasteltaessa yhteensovitus paransi keskiarvoista tulosta 56 % pistejoukoista, vaikka E-suunnassa vain 33 % pistejoukoista siirtyi parempaan suuntaan.

Keskiarvoisten heading-kiertokulmien suhteen suurin osa pistejoukoista siirtyi keskiarvoltaan huonompaan suuntaan koko alueella (53 %) ja metsäalueella (61 %) (katso Liitteet) koeaineiston alkuperäisten pistejoukkojen sisäisessä vertailussa. Kun tarkasteltiin keskiarvoisia siirtoja ja keskiarvoista heading-kiertokulmaa yhdessä, niin suurimmalle osalle pistejoukoista muutos oli keskiarvoltaan neutraali koko alueella (58 %) ja metsäalueella (44 %). Metsäalueella oli lähes yhtä paljon eli 39 % keskiarvoltaan parempaan suuntaan siirtyneitä pistejoukkoja. Metsäalueella vain 17 % keskiarvoisista pistejoukoista siirtyi keskiarvoltaan huonompaan suuntaan. Koko alueella vastaava luku oli 28 % ja keskiarvoltaan parempaan suuntaan siirtyneitä oli vain 14 % pistejoukoista.

Yhteensovitus aiheutti koko alueella E- ja N-suunnissa (Taulukko 8) parantuneissa pistejoukoissa selkeästi suuremman keskiarvoisen parannuksen (0,42 m ja 0,09 m) ja huonontuneissa pistejoukoissa keskiarvoisesti pienemmän huonontumisen (0,26 m ja 0,13 m) koeaineiston ja vertausaineiston välillä kuin koeaineistojen pistejoukkojen keskinäisessä vertailussa (0,08 m ja 0,06 m sekä 0,33 m ja 0,18 m) (Taulukko 8). Korkeussuunnassa luvut olivat toisinpäin eli parantuminen keskiarvoltaan parantuneilla pistejoukoilla oli suurempaa ja keskiarvoltaan huonontuneilla pistejoukoilla huonontuminen pienempää koeaineistojen sisällä kuin koeaineiston ja vertausaineiston välillä. Metsäalueella kaikki siirrot parantuivat keskiarvoltaan koeaineiston alkuperäisten parantuneiden pistejoukkojen keskinäisissä yhteensovituksissa (0,10 m, 0,10 m ja 0,12 m) enemmän kuin vertausaineistoon nähden (0,02 m, 0,08 m ja 0,09 m). Keskiarvoisissa heading-kiertokulmissa koko alueen ja metsäalueen parannus oli keskiarvoltaan suurempaa koeaineiston ja vertausaineiston parantuneiden pistejoukkojen välillä kuin koeaineiston alkuperäisten parantuneiden pistejoukkojen sisäinen keskiarvoinen muutos.

E- ja N-vertailu oli manuaalinen. Lisäksi E- ja N-arvot mitattiin kultakin pistejoukolta vain neljä kertaa. Kierrot selvitettiin mitattujen E- ja N-arvojen avulla vain yhdessä suunnassa eli korkeussuunnan ympäri (heading). Tulosten luotettavuus parantuisi, jos E- ja N-arvoja olisi mitattu jokaiselta pistejoukolta useampia. Tulosten luotettavuutta olisi parantanut myös mittausten automaattinen tarkastelu manuaalisten mittausten sijaan. E- ja N-etäisyyksien sekä heading-kiertokulmien selvittäminen korkeussuunnan lisäksi oli tärkeää. Painotaisin enemmän korkeussuuntaisten tulosten vaikutusta, koska ne laskettiin suuremmasta pistejoukosta automaattisesti. Automaattisiin menetelmiin ei tule käyttäjän aiheuttamaa virhettä ja aineiston laajempi tarkastelu vähentää paikallisten virheiden vaikutusta.

TerraScan-ohjelman Output Control Report -työkalun käyttäminen oli hyvä ratkaisu, koska se laski korkeussuuntaiset tulokset automaattisesti. Toisaalta sekin vaati jokaiselle pistejoukolle erillistä manuaalista käsittelyä. Työkalussa oli haasteena tutkimuksen kannalta myös se, että vertailu tapahtui vain korkeussuunnassa. Vaihtoehtona tarkasteltiin TerraScan-ohjelman Compare with Reference -työkalua (Soininen A., 2012 b, s. 296). Compare with Reference -työkalu vertailee kahta pistejoukkoa, jotka sijaitsevat samassa sijainnissa. Työkalu oli tarkoitettu muutostulkinnan avuksi. TerraScan-ohjelman käyttöohjeen mukaan (Soininen A., 2012 b, s. 289) Output Control Report -työkalu soveltui paremmin tämän tutkimuksen tulosten vertailuun. Output Control Report -työkalun huonona puolena oli se, että se vaatii tietokoneelta kohtuullisen suuria tehoja laskentaa varten. Tutkimuksessa käytetyt tiedostot olivat kohtuullisen suuria pistetiedostoja.

TerraScan-ohjelman Output Control Report -työkalun raportista nähtiin myös ne pisteet, joille ei löytynyt suunnilleen samalla sijainnilla olevaa vertailujoukon pistettä. Tällaisille pisteille ei saatu korkeussuuntaista vertailuarvoa lainkaan. Tällaiset pisteet johtuivat muutamista eri syistä. Voi olla, että toisen pistejoukon alueelta ei keilattu koko aluetta tunte mattomasta syystä tai keilain liikkui pistejoukkojen kohdalla eri reittiä. Tällöin keilaimen aiheuttamat katvealueet olivat pistejoukoissa keskenään eri kohdissa ja yhteisiä pisteitä löytyi vähemmän. Pistetiedosto saattoi myös siirtyä yhteensovituksen aikana niin paljon, että yhteisiä pisteitä oli aiempaa vähemmän. Puuttuvien vertauspisteiden suuri määrä saattoi kertoa siitä, että pistejoukot sovittuivat yhteen huonosti. Toisaalta se saattoi yhtä hyvin kertoa siitä, että keilaimella mitattiin jokin kohta eri tavalla. Molemmat selitykset olivat mahdollisia. Puuttuvista vertauspisteistä saatua määrällistä tietoa ei voitu hyödyntää tutkimuksessa luotettavasti.

Lopputulokseen vaikutti valittujen pisteiden lisäksi myös iteraatiokierrosten lukumäärä. Oletuksena oli, että iteraatiokierrosten määrän kasvaessa lopputulos parantuisi. Iteraatiokierrosten suuri määrä saattaa myös huonontaa yhteensovituksen lopputulosta, jos yhteensovitus lähtee heti alussa väärään suuntaan. Yhteensovitus lähtee väärään suuntaan, jos käytössä on huono likiarvo tai lähtöaineisto. Tällöin vastaukseksi tulee paikallinen minimi todellisen kohdan sijaan (Hyypä, Ahlavoja ja Kukko, 2009). Siksi ICP-menetelmää käytettäessä oli tärkeää, että aineistot olivat jo lähtökohtaisesti riittävän lähellä toisiaan. Iteraatiokierrosten lukumääräksi valittiin tutkimuksessa 1000 kierrosta. Kierrosten määrä olisi voinut olla enemmänkin, jotta lopputuloksesta olisi voitu saada vielä tarkempi. Toisaalta jokaisella iteraatiokierroksella käytettiin kaikkia koeaineiston pistejoukkojen pisteitä. Jos iteraatiokierrosten määrää olisi lisätty, niin ensimmäisillä kierroksilla olisi voinut olla vähemmän pisteitä käytössä. Tällöin käytettävien pisteiden määrää olisi voinut kasvattaa iteraatiokierrosten kasvaessa. Iteraatiokierrosten ja käytettyjen pisteiden välisellä suhteella saattoi olla merkitystä yhteensovituksen lopputulokseen.

## 6. Johtopäätökset

Tässä luvussa tarkastellaan saatujen tulosten vaikutuksia ja jatkotutkimusideoita. Luvussa pohditaan tutkimusta kokonaisuutena ja esitellään tuloksista tehdyt johtopäätökset.

Maanpinnan parempi automaattinen luokittelu kaipaa kehittelyä. Yhteensovituksessa voisi jättää kokonaan huomioimatta liian kaukana toisistaan olevat pisteet. Pisteiden poisto voisi tapahtua aineiston alkuperäisen virhe-estimaatin avulla. Tällöin mahdolliset virheelliset maanpinnan pisteet eivät vaikuttaisi yhteensovitukseen. Aihe vaatii lisätutkimusta. Tulosten vertailussa olisi voitu tarkastella myös tulosten vaikutusta koko aineistoon pelkän maanpinnan sijaan. Olisi ollut mielenkiintoista havaita oliko yhteensovituksella vaikutusta etenkin puiden runkojen tunnistamiseen ja oikeaan sijaintiin metsäympäristössä. Tällainen tarkastelu vaatisi lisätutkimusta. Tällöin myös yhteensovitus tulisi tehdä koko pistejoukoille pelkän maanpinnan sijaan.

Leikkauskohtien määrällä ja sijainnilla saattoi olla merkitystä lopputulokseen. Leikkauskohtien määrän kasvattaminen lisäisi yhteensovitettavien kohtien määrää. Toisaalta liian suuri leikkauskohtien määrä voisi luoda turhia päällekkäisiä pistetiedostoja, joiden välillä ei olisi eroja. Jo mittausreitin suunnittelussa voisi kiinnittää huomiota leikkauskohtien riittävään luomiseen. Leikkauskohtien määrien ja sijoittelun vaikutus vaatii lisätutkimuksia. Trajektorin rinnakkaisia kohtia voisi hyödyntää leikkauskohtien tavoin. Trajektorin kahdella rinnakkain olevalla kohdalla pitäisi olla mitattuna yhteisiä alueita leikkauskohtien tavoin. Leikkauskohtien lisäksi iteraatiokierrosten määrän vaikutuksesta yhteensovitukseen tulisi kerätä lisää tietoa.

ICP oli hyvä yhteensovitusmenetelmä sen monipuolisuuden vuoksi. Pistejoukko saattoi olla siirtynyt tai kiertynyt. Sillä oli siis yhteensä 6 vapausastetta. Siirtyminen olisi voinut tapahtua kolmeen eri suuntaan: E-, N- ja korkeussuuntaan. Myös kiertoa olisi voinut tapahtua kolmeen eri suuntaan eli jokaisen suunta-akselin ympäri. ICP-menetelmä huomioi siirtojen ja kiertojen aiheuttamat muutokset yhtä aikaa. Yhteensovituksen vaikutuksista kiertoihin olisi ollut hyvä tehdä oma tarkastelu. Kierrot ja siirrot vaikuttavat myös toisiinsa. Riittävä kiertojen sekä E- ja N-suuntien tarkastelu ei ollut mahdollista tämän tutkimuksen rajoissa. Kiertojen tarkastelu vaatii lisätutkimusta.

PLS-aineistojen geometrinen laatua metsäympäristössä voidaan parantaa yhteensovituksella. Geometrinen tarkkuus parantui etenkin korkeussuunnassa. Metsäympäristö parantui yhteensovituksessa keskiarvoisesti kummassakin vertailussa N- ja korkeussuunnassa (Taulukko 8). Geometrisen laadun parantuminen metsäympäristössä oli keskiarvoisesti suurempaa koeaineiston sisällä kuin koeaineiston ja vertausaineiston välillä. Yhteensovituksen jälkeen metsäalueella keskiarvoinen geometrinen tarkkuus oli parempi koeaineiston sisällä kuin koeaineiston ja vertausaineiston välinen keskiarvoinen geometrinen tarkkuus N- ja korkeussuunnassa (Taulukko 7). Molemmissa vertailuissa E- ja N-suunnissa keskiarvoinen geometrinen tarkkuus oli parempi metsäalueilla kuin koko alueen keskiarvoinen geometrinen tarkkuus yhteensovituksen jälkeen (Taulukko 7). Korkeussuunnassa molemmissa vertailuissa keskiarvoinen geometrinen tarkkuus oli parempi koko alueella kuin metsäalueella, vaikka parannusta tapahtui kummallakin alueella molemmissa vertailuissa (Taulukko 7). Koeaineistojen sisäisen vertailun heading-kiertokulmien keskiarvoinen geometrinen laatu oli yhteensovituksen jälkeen parempi koko alueella kuin metsäalueella. Koeaineiston ja vertausaineiston välisessä vertailussa suhteet menivät toisinpäin.

Kaikki keskiarvoiset siirrot parantuivat yhteensovituksen myötä koko alueella koeaineiston ja vertausaineiston välillä (Taulukko 8). Heading-kiertokulman keskiarvoiset kulmat huonontuivat, vaikka suurimmassa osassa heading-kiertokulmien pistejoukoista tapahtui parannusta molemmilla alueilla (katso Liitteet). Myös N- ja korkeussuunnissa suurimmassa osassa pistejoukoista tapahtui parannusta. E-suunnassa suurimmassa osassa eli 62 % pistejoukoista tapahtui huonontumista (Kuvaaja 9 ja Liitteet), vaikka keskiarvoetäisyys koko alueella koe- ja vertausaineistojen pistejoukkojen välillä parantui keskiarvoisesti (Taulukko 8).

Metsäalueella N- ja korkeussuunta parantuivat keskiarvoisesti (Taulukko 8) ja suurimmassa osassa pistejoukkoja (Kuvaaja 9 ja Liitteet) tapahtui yhteensovituksen myötä keskiarvoista parantumista koeaineiston ja vertausaineiston välisessä vertailussa. Heading-kiertokulmat huonontuivat keskiarvoisesti metsäalueellakin (Taulukko 8), vaikka jälleen suurimmassa osassa (64 %) pistejoukkoja tapahtui keskiarvoisissa heading-kiertokulmissa parannusta yhteensovituksen myötä (katso Liitteet). E-suuntainen keskiarvo huonontui (Taulukko 8) ja suurimmassa osassa (86 %) pistejoukkoa (Kuvaaja 9 ja Liitteet) tapahtui keskiarvoista huonontumista yhteensovituksen myötä metsäalueella. Vaikka E-suunta huonontui alkuperäisestä keskiarvosta metsäalueella, niin E-suuntainen aineistojen välinen keskiarvoinen ero 0,12 m (Taulukko 7) oli kuitenkin parempi metsäalueella kuin koko alueen E-keskiarvoetäisyys 0,26 m.

Yhteensovitus paransi koeaineiston alkuperäisten pistejoukkojen sisäistä geometrista tarkkuutta 56 % pistejoukoista metsäalueella (Kuvaaja 10 ja Liitteet), mutta vain 32 % pistejoukoista koko alueella, kun kaikkien siirtojen vaikutus huomioitiin yhdessä. Alkuperäisten pistejoukkojen välillä yhteensovitus siis huononsi useamman pistejoukon sisäistä geometrista laatua koko alueella, vaikka paransikin yli puolia metsäalueella.

Yhteensovitus paransi keskiarvoisia heading-kiertokulmia koeaineiston ja vertausaineiston välillä koko alueella 52 % ja metsäalueella 64 % (katso Liitteet) pistejoukoista. Kummallakin alueella tapahtui prosentuaalisesti enemmän parannusta kuin huonontumista, vaikka heading-kiertokulmakekskiarvojen keskiarvo huonontui koko alueella  $2,31^\circ$  ja metsäalueella  $7,41^\circ$  (Taulukko 8) koeaineiston ja vertausaineiston välillä. Heading-kiertokulmien keskiarvojen kasvua voi selittää se, että huonontuneissa pistejoukoissa huonontuminen oli niin suurta, että heading-kiertokulmien keskiarvot huonontuivat parantuneiden pistejoukkojen suuresta määrästä huolimatta.

Kun tarkasteltiin kaikkia siirtoja ja heading-kiertokulmia yhdessä, niin yhteensovitus paransi koeaineiston ja vertausaineiston välistä keskiarvoista eroa (katso Liitteet) yli kahdella viidesosalla eli 43 % pistejoukoista koko alueella ja metsäalueella. Kolmanneksessa pistejoukoissa siirtojen ja kiertojen yhteisvaikutus oli neutraali kummallakin alueella. Muutujien parannukset sijoittuivat ilmeisesti eri pistejoukkoihin, koska N-, korkeus- ja heading-kiertokulmien suunnissa yli puolet pistejoukoista parantui yhteensovituksen myötä kummallakin alueella.

Koeaineisto oli jo alun perin koko alueella lähempänä vertausaineistoa keskiarvoisissa N- (0,14 m) ja korkeussuunnissa (0,11 m) kuin keskiarvoisessa E-suunnassa (0,26 m) (Taulukko 7). Metsäalueella taas koeaineisto oli alun perin E-suunnassa keskiarvoisesti lähempänä 0,04 m päässä vertausaineistosta (Taulukko 7), kun N- ja korkeussuunnat keskiarvoisesti kauempana 0,13 m ja 0,16 m. Yhteensovituksen jälkeen pistejoukot olivat suunnilleen yhtä etäällä toisistaan metsäalueella. E-suunta on suurimmassa osassa koeaineiston pistejoukkoja huonontunut (Kuvaaja 9 ja Liitteet) N- ja korkeussuuntien parantuessa, koska



koeaineiston pistejoukot olivat jo alun perin E-suunnassa keskiarvoisesti lähellä vertausaineistoa. ICP-menetelmä yritti parantaa pistejoukkoja kaikissa suunnissa ja kierroissa, jolloin aluksi ollut hyvä E-suuntainen keskiarvoetäisyys kärsi yhteensovituksessa muiden suuntien huonompien etäisyyksien parantuessa.

Koeaineiston sisäisessä vertailussa ICP-menetelmä vaikutti vastaavalla tavalla heading-kiertokulmaan saadakseen N-suunnan parantumaan metsäalueella. Koeaineiston pistejoukkojen keskinäisessä vertailussa keskiarvoiset heading-kiertokulmat huonontuivat 53 % koko alueen ja 61 % metsäalueen (katso Liitteet) pistejoukoista yhteensovituksen myötä. Keskiarvoiset heading-kiertokulmat huonontuivat koeaineiston sisällä metsäalueella enemmän eli keskiarvoltaan  $19,60^\circ$  (Taulukko 8) kuin koko alueella ( $7,01^\circ$ ), vaikka pistejoukot olivat alun perin keskiarvoltaan vähemmän kiertyneitä ( $70,25^\circ$ ) metsäalueella kuin koko alueella ( $72,36^\circ$ ) (Taulukko 7).

Koeaineiston sisäinen geometrinen tarkkuus parantui koko alueella vain joka seitsemännessä eli 14 % pistejoukossa (katso Liitteet), kun tarkasteltiin keskiarvoisia siirtoja ja kiertoja yhdessä. Suurimmassa osassa eli 58 % pistejoukoista vaikutus oli neutraali. Neutraalien (58 %) ja negatiivisten (28 %) muutosten suurta määrää selittää se, että E- ja N-suunnat sekä heading-kiertokulmat huonontuivat keskiarvoisesti useimmissa pistejoukoissa, mutta korkeussuunnat taas vastaavasti parantuivat. E- ja N-suuntien huonontuminen ja korkeussuunnan parantuminen koeaineiston sisäisessä vertailussa on yllättävää, koska pistejoukot olivat ennen yhteensovitusta kaikissa suunnissa koko alueella suunnilleen yhtä etäällä toisistaan eli keskiarvoisesti 0,05–0,06 metrin päässä toisistaan (Taulukko 7).

Metsäalueella koeaineiston sisäinen geometrinen parannus oli hieman parempi, kun tarkasteltiin keskiarvoisia siirtoja ja kiertoja yhdessä (katso Liitteet). Neutraaleja 44 % ja parantuneita 39 % pistejoukkoja (katso Liitteet) oli lähes yhtä paljon. Metsäalueella korkeussuunnassa kaikki ja N-suunnassa puolet pistejoukoista parantui keskiarvoltaan yhteensovituksen myötä. N-keskiarvoetäisyyksien keskiarvo oli koeaineiston sisäisessä vertailussa koko alueella alun perin lähes puolet 0,05 m (Taulukko 7) metsäalueen keskiarvosta 0,10 m. Yhteensovituksen myötä koko alueen keskiarvoetäisyyksien keskiarvo (0,16 m) yli kolminkertaistui koko alueella, kun metsäalueella (0,08 m) se päinvastoin parantui. Myös E- ja heading-kiertokulmien keskiarvot huonontuivat keskiarvoltaan koko alueella koeaineiston sisäisessä vertailussa yhteensovituksen myötä (Taulukko 7). Heading-kiertokulmat liittyvät suoraan E- ja N-suuntiin, koska heading-kiertokulmat selvitettiin E- ja N-suuntien avulla. Heading-kiertokulma-keskiarvot huonontuivat koeaineiston sisäisessä vertailussa koko alueella siihen nähden yllättävän vähän eli keskiarvoltaan vain  $7,01^\circ$  (Taulukko 8) samaan aikaan, kun E-suuntainen keskiarvoetäisyys huonontui yli viisinkertaiseksi (Taulukko 7) ja N-suuntainen yli kolminkertaiseksi.

Korkeussuunnassa koeaineiston sisäisen geometrian parannus metsäalueella oli keskiarvoltaan 0,12 m ja koko alueella 0,05 m (Taulukko 8). Korkeussuuntainen keskiarvoinen parannus oli merkittävää, koska pistejoukot olivat alun perin metsäalueella keskiarvoltaan 0,13 m ja koko alueella 0,06 m päässä toisistaan (Taulukko 7) ja yhteensovituksen jälkeen vain 0,01 m päässä metsäalueella ja koko alueella 0,01 m päässä toisistaan. Yhteensovituksen jälkeen pistejoukot olivat koeaineiston sisäisessä vertailussa metsäalueella ja koko alueella keskiarvoisesti lähes saman etäisyyden päässä toisistaan, vaikka alun perin metsäalueen pistejoukot olivat keskiarvoltaan yli kaksi kertaa kauempana kuin koko alueen pistejoukot. Vain joka kuudes pistejoukko eli 17 % (katso Liitteet) huonontui keskiarvoltaan metsäalueella yhteensovituksen myötä koeaineiston sisäisessä vertailussa,

kun tarkastellaan kaikki siirtoja ja kiertoja yhdessä. Geometrisen laadun parantuminen on tärkeää, jotta PLS-keilaukset voidaan tehdä luotettavasti metsäympäristössä.

Koeaineiston geometrinen tarkkuus vertausaineistoon nähden jäi korkeussuunnassa vielä keskiarvoisesti etäiseksi (0,11 m) koko alueella ja (0,15 m) metsäalueella (Taulukko 7), vaikka se parantuikin yhteensovituksen myötä. Koeaineiston ja vertausaineiston väliltä löytyi välillä huonosti yhteisiä pisteitä. Yhteisten pisteiden vähäisyys saattoi vaikuttaa huonoon korkeussuuntaiseen keskiarvoetäisyyteen. Vertausaineiston parempi laatu olisi saattanut parantaa tuloksia. Koeaineiston sisäisen geometrisen laadun parantuminen oli suurempaa eli keskiarvoltaan 0,12 m metsäalueella kuin koko aineiston keskiarvoinen parantuminen 0,05 m (Taulukko 8). Eroa selittää se, että metsäalueella kaikki pistejoukot parantuivat (Kuvaaja 10 ja Liitteet). Vaikka koeaineiston ja vertausaineiston välillä tapahtui keskiarvoisesti useammassa pistejoukossa keskiarvoista parantumista (Kuvaaja 9 ja Liitteet), niin koeaineiston sisäinen geometrinen laatu oli silti metsäalueella keskiarvoltaan parempi N- ja korkeussuunnassa yhteensovituksen jälkeen (Taulukko 7) kuin vertausaineistoon nähden.

Yhteensovituksella parannettiin korkeussuuntaista geometrista laatua keskiarvoisesti kaikilla alueilla sekä aineistojen sisällä että vertausaineistoon nähden (Taulukko 8). Keskiarvoiset heading-kiertokulmat päinvastoin huonontuivat keskiarvoisesti kaikilla alueilla koeaineiston sisällä ja vertausaineistoon nähden. Metsäympäristössä korkeussuunnan lisäksi N-suuntainen geometrinen laatu parantui keskiarvoltaan. Kaikkien muuttujien geometrinen laatu vertausaineiston ja koeaineiston välillä oli metsäalueella keskiarvoltaan parempi kuin koko alueella lukuun ottamatta korkeussuuntaa (Taulukko 7). Koeaineiston sisäinen geometrinen laatu oli yhteensovituksen jälkeen E- ja N-suunnassa keskiarvoltaan parempi metsäalueella kuin koko alueella (Taulukko 7).

Yhteensovituksella voidaan parantaa aineistojen geometrista laatua metsäympäristössä N- ja korkeussuunnassa (Taulukko 8). Geometrista laatua voidaan parantaa korkeussuunnassa kaikilla alueilla aineistojen sisällä ja vertausaineistoon nähden. Yhteensovitus huononsi heading-kiertokulmia kaikilla alueilla aineistojen sisällä ja vertausaineistoon nähden. Yhteensovituksella saatu keskiarvoinen geometrisen laadun parannus metsäalueella oli vertausaineistoon nähden N-suunnassa 0,01 m ja korkeussuunnassa 0,01 m. Koeaineiston sisäinen geometrisen laadun parantuminen metsäalueella oli N-suunnassa 0,02 m ja korkeussuunnassa 0,12 m.

TLS-aineisto toimi tutkimuksen vertausaineistona, joten yhteensovituksen myötä tullut parannus oli toivottua. Myös vertausaineiston georeferoinnissa saattoi olla ongelmia metsäalueilla huonon satelliittinäkyvyyden vuoksi. Kaikkia muuttujia tarkasteltaessa parantuneita pistejoukkoja oli määrällisesti suhteessa enemmän koeaineiston ja vertausaineiston välillä kuin koeaineiston sisäisessä vertailussa (katso Liitteet). Asiaa saattaa selittää se, että yhteensovituksessa käytetyn pistetiedoston valinnalla voi olla merkitystä. Jos esimerkiksi jo alun perin huonompaa pistetiedostoa pidetään paikallaan, niin silloin aluksi oikeammas- sa oleva siirtyy vielä kauemmas todellisesta vertausaineiston pisteistöstä, vaikka se siirtyisi lähemmäs toista leikkauskohdan pistejoukkoa. Siirrettävän pistetiedoston valinnan merkitystä voisi pienentää käyttämällä korjauksissa puolikasta virhettä tai painottamalla trajektoria laatuestimaatilla. Siirrettävän pistetiedoston valinta ja sen vaikutukset vaativat lisätutkimusta.

Yhteensovitus paransi tuloksia korkeussuunnassa odotetusti eniten metsäympäristössä eli niillä alueilla, joissa oli muita alueita huonompi GNSS-näkyvyys. Huonosta GNSS-näky-

vyydestä johtuen tutkimuksen alussa eriaikaiset mittaukset erosivat toisistaan ja aineistoissa havaittiin sisäistä sijaintivirhettä. Koetyöalueeksi havaittiin ensisijaisesti metsäalue. Tiealueella maasto oli tasaista, jolloin yhteensovitukseen ei löytynyt tarpeeksi piirteitä. Vähäiset piirteet vaikeuttivat yhteensovitusta ja tällöin yhteensovituksen myötä tulos huonontuu. Vastaavasti metsäympäristössä oli paljon pieniä piirteitä, kuten kiviä ja maastonmuotoja. Tällöin metsässä yhteensovituksen tulisikin onnistua tasaisia maastoja paremmin.

Yhteensovituksesta saatuja arvoja voitaisiin käyttää koko pistejoukon yhteensovitukseen tai virheen korjaus voidaan jakaa trajektorille ajan funktiona. Jaon voisi tehdä tasaisesti tai suhteellisesti huonompien kohtien ympärille painottaen. Tuloksissa saatu virhe oli paikallinen tietyn leikkauskohdan pistejoukkojen virhe. Jos virhe jaettaisiin koko trajektorille, niin yksittäisten kohtien virhe pienenis. Tällöin virheen vaihteluväli koko pistepilven alueella pienenis. Toisaalta trajektorille tasaisesti jaettu virhe loisi sijaintivirhettä myös kohtiin, joissa alun perin olisi ollut oikea sijainti. Virheen jakamisen avuksi voisi mitata tukihavaintoja leikkauskohtien ympärille. Virheen jakaminen painotetusti leikkauskohtien mukaan voisi jakaa virhettä oikeellisemmin. Painotus voisi olla suurempi sellaisten leikkauskohtien ympärillä, joissa olisi havaittu suurempaa virhettä. Toisaalta virhettä voisi olla myös leikkauskohtien ulkopuolella. Tällöin leikkauskohtien ulkopuoliset virheelliset kohdat jäisivät yhä virheellisinä ja muuttumattomina trajektoriin. Virheen jakaminen trajektorille olisi hyvä toteuttaa automaattisesti osana aineistojen jälkikäsitelyä. Virheen jakautumista trajektorille tulee tutkia lisää.

Tutkimukseen valittiin yhteensovituksen toteuttamiseen ICP-menetelmä. ICP-menetelmä oli tunnettu menetelmä. Jokin muu menetelmä tai variaatio ICP-menetelmästä voisi toimia tehokkaammin ja paremmin kuin tutkimuksessa valittu ratkaisu. Kabsch-valinnan sijaan esimerkiksi jokin toinen ratkaisu voisi tuottaa toivotumman lopputuloksen. Tutkimuksessa oli rajattu aika ja aihealue, joten useampia menetelmiä ei päästy kokeilemaan. Tutkimuksessa tarkasteltiin muutamia eri vaihtoehtoja, joista valittiin sillä hetkellä sopivimmat ratkaisut.

ICP-menetelmää voisi käyttää metsän lisäksi myös muissa ympäristöissä, joissa GNSS-kuuluvuus ei ole koko ajan riittävän hyvä oikean sijainnin säilyttämiseksi. Avoimilla alueilla GNSS-signaalin pitäisi tuottaa riittävän hyvä ja oikea sijaintitieto ilman vastaavaa yhteensovitusprosessia. Sisätiloissa ei saada ylipäättäen riittävästi sijaintitietoa GNSS-paikannuksen avulla, joten sisätiloissa kannattaa soveltaa muita menetelmiä. Tutkimuksessa käytetty menetelmä sopisi metsien lisäksi esimerkiksi rakennettuun ympäristöön, jossa rakennukset häiritsevät GNSS-paikannusta ajoittain, mutta sijaintitieto on välillä saatavissa.

Kolmiulotteisen siirron ja heading-kiertokulman vertailu oli hankalaa epäluotettavamman manuaalisen vertailumenetelmän takia. Manuaalisten menetelmien ongelmana oli se, että jokainen tiedosto täytyi käsitellä erikseen. Tällainen menettely oli erityisen aikaa ja resursseja vievää, etenkin jos käsiteltäviä tiedostoja oli paljon. Lisäksi manuaalinen aineistojen käsittely ei ole käyttäjän mahdollisesti tekemien virheiden vuoksi yhtä tarkkaa kuin las kennallinen vertailu. Korkeussuunnan hyvää tulosta voi pitää tärkeämpänä ja luotettavampana kuin muiden suuntien ja heading-kiertokulmien tuottamaa tulosta. Yhteensovitusta pitää vielä parantaa, jotta myös E- ja N-suunta ja heading-kiertokulmat saadaan paremmiksi yhteensovituksen myötä. Jatkossa korkeussuuntaisten erojen parantamiseen voidaan käyttää yhteensovitusta sekä metsä- että muussa ympäristössä. Yhteensovitus saattaa samalla huonontaa muiden suuntien välisiä eroja, vaikka korkeussuunnassa pistejoukkojen

väliset erot parantuisivat. Geometrisen laadun parantuminen metsäympäristössä on merkittävää, koska tutkimuksessa haluttiin selvittää geometrisen laadun parantamista nimenomaan metsäympäristössä.

## Lähdeluettelo

**Alho P., Hyyppä H., Hyyppä J., Flener C., Kasvi E., Vaaja M., Kukko A., Lotsari E., Hohenthal J., Kurkela M., Kaartinen H. ja Haggrén H. (2011)**, Uudet mittausmenetelmät jokiympäristön kartoituksessa, The Photogrammetric Journal of Finland, Vol. 22, Nro 3, 2011, s. 115–127, Viitattu 21.2.14, Verkkojulkaisu: [http://foto.hut.fi/seura/julkaisut/pjf/pjf\\_e/2011/PJF2011\\_3\\_Alho\\_et\\_al.pdf](http://foto.hut.fi/seura/julkaisut/pjf/pjf_e/2011/PJF2011_3_Alho_et_al.pdf)

**Alho P., Kukko A., Hyyppä H., Kaartinen H., Hyyppä J. ja Jaakkola A. (2009)**, Application of boat-based laser scanning for river survey, Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 34, Nro 13, s. 1831–1838, Viitattu 26.8.14

**Axelsson P. (2000)**, DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIII, Part B4, Viitattu 26.8.14, Verkkojulkaisu: [http://www.isprs.org/proceedings/XXXIII/congress/part4/111\\_XXXIII-part4.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXIII/congress/part4/111_XXXIII-part4.pdf)

**Baltsavias E. P. (1999)**, Airborne laser scanning: basic relations and formulas, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54 (1999), s. 199–214, Viitattu 25.8.14

**Bellian J. A., Kerans C. ja Jennette D.C. (2005)**, Digital Outcrop Models: Applications of terrestrial scanning LiDAR technology in stratigraphic modeling, Journal of Sedimentary Research 75, s. 166–176, Viitattu 25.8.14, Verkkojulkaisu: [http://www.beg.utexas.edu/staffinfo/pdf/bellian\\_jsr\\_2005.pdf](http://www.beg.utexas.edu/staffinfo/pdf/bellian_jsr_2005.pdf)

**Chrutchley S. (2009)**, Using LiDAR in Archaeological Contexts: The English Heritage Experience and Lessons Learned, Laser Scanning for the Environmental Sciences, Wiley-Blackwell, s. 180–200, Viitattu 25.8.14

**Devereux B. ja Amable G. (2009)**, Airborne LiDAR: Instrumentation, Data Acquisition and Handling, Laser Scanning for the Environmental Sciences, Wiley-Blackwell, s. 49–66, Viitattu 25.8.14

**Elseberg J., Borrmann D. ja Nüchter A. (2013)**, A Study of Scan Patterns for Mobile Mapping, Proceedings of the ISPRS Conference on “Serving Society with Geoinformatics”, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XL-7/W2, s. 75–80, Antalya, Turkey, Viitattu 10.3.14, Verkkojulkaisu: <http://plum.eecs.jacobs-university.de/download/ssg2013.pdf> ja <http://www7.informatik.uni-wuerzburg.de/mitarbeiter/nuechter/publications/>

**Gressin A., Mallet C., Demantké J. ja David N. (2013)**, Towards 3D lidar point cloud registration improvement using optimal neighborhood knowledge, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 79, s. 240–251, Viitattu 8.7.14

**Haara A. ja Korhonen K. T. (2004)**, Kuvioittaisen arvioinnin luotettavuus, *toim.* Korpi-lahti E., Metsätieteen aikakauskirja, 4/4004, s. 489–508, Viitattu 5-6.3.14, Verkkojulkaisu: <http://metla.eu/aikakauskirja/full/ff04/ff044489.pdf>

**Heritage G. L. ja Large A. R. G (2009)**, Principles of 3D Laser Scanning, Laser Scanning for the Environmental Sciences, Wiley-Blackwell, s. 21–34, Viitattu 25.8.14

- Holopainen M., Hyypä J., Vastaranta M. ja Hyypä H. (2011)**, Laserkeilaus metsävarojen hallinnassa, *The Photogrammetric Journal of Finland*, Vol. 22, Nro 3/2011, s. 128–149, Artikkel, Viitattu 20.2.14, Verkkojulkaisu: [http://foto.hut.fi/seura/julkaisut/pjf/pjf\\_e/2011/PJF2011\\_3\\_Holopainen\\_et\\_al.pdf](http://foto.hut.fi/seura/julkaisut/pjf/pjf_e/2011/PJF2011_3_Holopainen_et_al.pdf)
- Honkavaara E. (2003)**, Digitaalisten kuvien laatu, *Maanmittaustieteiden Seuran julkaisu* 40, 9 s., *Maanmittaustieteiden päivät 2003*, Viitattu 4.7.14, Verkkojulkaisu: <http://mts.fgi.fi/paivat/2003/paperit/honkavaara.pdf>
- Hyypä H. ja Hyypä J. (2003)**, Laserkeilauksen laatu ja sen osatekijät, *Maanmittaustieteiden seuran julkaisu* 40, *Maanmittaustieteiden päivät 2003*, Viitattu 27.2.14, Verkkojulkaisu: <http://mts.fgi.fi/paivat/2003/paperit/hyypa.pdf>
- Jaakkola A., Hyypä J., Kukko A., Yu X., Kaartinen H., Lehtomäki M. ja Lin Y. (2010)**, A Low-cost multi-sensoral mobile mapping system and its feasibility for tree measurements, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 65, s. 514–522, Viitattu 2.4.14
- Joala V. (2003)**, Laserkeilaimien toimintaperiaatteet ja kalibrointi, *Maanmittaustieteiden seuran julkaisu* 40, *Maanmittaustieteiden päivät 2003*, Viitattu 11.4.14 ja 14.4.14, Verkkojulkaisu: <http://mts.fgi.fi/paivat/2003/paperit/joala.pdf>
- Kaartinen H., Hyypä J., Kukko A., Jaakkola A. ja Hyypä H. (2012)**, Benchmarking the Performance of Mobile Laser Scanning Systems Using a Permanent Test Field, *Sensors* 2012, 12, s. 12814–12835, doi: 10.3390/s120912814, Viitattu 26.8.14
- Kaasalainen S., Kukko A. ja Hyypä H. (2011)**, Intensiteettitiedon hyödyntäminen laserkeilauksessa, *The Photogrammetric Journal of Finland*, Vol. 22, Nro 3/2011, s. 159–165, Viitattu 24.2.14, Verkkojulkaisu: [http://foto.hut.fi/seura/julkaisut/pjf/pjf\\_e/2011/PJF2011\\_3\\_Kaasalainen\\_et\\_al.pdf](http://foto.hut.fi/seura/julkaisut/pjf/pjf_e/2011/PJF2011_3_Kaasalainen_et_al.pdf)
- Kabsch W. (1976)**, A solution for the best rotation to relate two sets of vectors, *Acta Crystallographica Section A*, Vol. 32, Part 5, s. 922–923, Viitattu 5.9.14
- Kalman R. E. (1960)**, A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, *Journal of Basic Engineering*, ASME, Vol. 82, Series D, s. 35–45, Viitattu 11.9.14, Verkkojulkaisu: <http://www.cs.unc.edu/~welch/kalman/media/pdf/Kalman1960.pdf>
- King A. D. (1998)**, Inertial Navigation – Forty Years of Evolution, *GEC Review*, Vol. 13, Nro 3, s. 140–149, Viitattu 28.8.14, Verkkojulkaisu: [http://www.imar-navigation.de/downloads/papers/inertial\\_navigation\\_introduction.pdf](http://www.imar-navigation.de/downloads/papers/inertial_navigation_introduction.pdf)
- Korpela I. ja Välimäki E. (2007)**, Talousmetsän maanpintamallinnus arkistoilmakuvilta ja laserkeilauksella, *Maanmittaus* 82:2, s. 5–27, Viitattu 3.3.14, Verkkojulkaisu: [http://mts.fgi.fi/maanmittaus/numerot/2007/2007\\_2\\_korpela\\_valimaki.pdf](http://mts.fgi.fi/maanmittaus/numerot/2007/2007_2_korpela_valimaki.pdf)
- Kukko A., Anttila K., Manninen T., Kaasalainen S. ja Kaartinen H. (2013)**, Snow surface roughness from mobile laser scanning data, *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 96, s.23–35, Viitattu 26.8.14
- Kukko A., Kaartinen H., Hyypä J. ja Chen Y. (2012)**, Multiplatform Mobile Laser Scanning: Usability and Performance, *Sensors* 2012, 12(9), s. 11712–11733, doi:

10.3390/s120911712, Viitattu 26.8.14, Verkkojulkaisu: <http://www.mdpi.com/1424-8220/12/9/11712>

**Kurtz L. (2005)**, Digital Actors and Copyright – From the Polar Express to Simone, Symposium Review, Santa Clara Computer & High Technology Law Journal, Vol. 21, Nro 4, Artikkelin 5, s. 783–805, Viitattu 27.2.14, Verkkojulkaisu: <http://digitalcommons.law.scu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1391&context=chtlj>

**Liang X., Kukko A., Kaartinen H., Hyypä J., Yu X., Jaakkola A. ja Wang Y. (2014 a)**, Possibilities of a Personal Laser Scanning System for Forest Mapping and Ecosystem Services, *Sensors* 2014, 14, s. 1228–1248, doi: 10.3390/s140101228

**Liang X., Hyypä J., Kukko A., Kaartinen H., Jaakkola A. ja Yu X. (2014 b)**, The Use of a Mobile Laser Scanning System for Mapping Large Forest Plots, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, s. 1–5, Viitattu 28.7.14

**Lim M., Mills J. ja Rosser N. (2009)**, Laser Scanning Surveying of Linear Features: Considerations and Applications, *Laser Scanning for the Environmental Sciences*, Wiley-Blackwell, s. 245–261, Viitattu 25.8.14

**Matikainen L., Hyypä J., Karila K., Vaaja M. ja Kukko A. (2011)**, Laserkeilaus- ja kuva-aineistojen automaattinen tulkinta karttojen ajantasaistuksessa, *The Photogrammetric Journal of Finland*, Vol. 22, Nro 3/2011, s. 104–114, Viitattu 26.2.14, Verkkojulkaisu: [http://foto.hut.fi/seura/julkaisut/pjf/pjf\\_e/2011/PJF2011\\_3\\_Matikainen\\_et\\_al.pdf](http://foto.hut.fi/seura/julkaisut/pjf/pjf_e/2011/PJF2011_3_Matikainen_et_al.pdf)

**Närhi M., Maltamo M., Packalén P., Peltola H. ja Soimasuo J. (2008)**, Kuusen taimikoiden inventointi ja taimikonhoidon kiireellisyyden määrittäminen laserkeilauksen ja metsäsuunnitelmatietojen avulla, *toim. Korpilahti E., Metsätieteen aikakauskirja*, 1/2008, s. 5–15, Viitattu 20.2.14, Verkkojulkaisu: <http://www.metla.fi/aikakauskirja/full/ff08/ff081005.pdf>

**Overton I. C., Siggins A., Gallant J. C., Penton D. ja Byrne G., 2009**, Flood Modelling and Vegetation Mapping in Large River Systems, *Laser Scanning for the Environmental Sciences*, Wiley-Blackwell, s. 220–244, Viitattu 25.8.14

**Rönnholm P. ja Hyypä J. (2011)**, Ilmalaserkeilausaineistojen ja ilmakuvien keskinäinen orientointi, *The Photogrammetric Journal of Finland*, Vol. 22, Nro 3, 2011, s. 92–103, Viitattu 11.4.14, Verkkojulkaisu: [http://foto.hut.fi/seura/julkaisut/pjf/pjf\\_e/2011/PJF2011\\_3\\_Ronnholm\\_Hyypa.pdf](http://foto.hut.fi/seura/julkaisut/pjf/pjf_e/2011/PJF2011_3_Ronnholm_Hyypa.pdf)

**Suvanto A., Maltamo M., Packalén P. ja Kangas J. (2005)**, Kuviokohtaisten puustotunnusten ennustaminen laserkeilauksella, *toim. Korpilahti E., Metsätieteen aikakauskirja*, 4/2005, Metsäntutkimuslaitos ja Suomen Metsätieteellinen seura, s. 413–428, Viitattu 4.5.3.14, Verkkojulkaisu: <http://www.metla.eu/aikakauskirja/full/ff05/ff054413.pdf>

**Vastaranta M., Holopainen M., Kaartinen H., Hyypä H. ja Hyypä J. (2009)**, Uudistuneet metsien maastomittaustarpeet, *toim. Korpilahti E., Metsätieteen aikakauskirja*, 4/2009, Metsäntutkimuslaitos ja Suomen Metsätieteellinen seura, s. 370–374, Viitattu 26.2.14, Verkkojulkaisu: <http://www.metla.fi/aikakauskirja/full/ff09/ff094370.pdf>

**Vilhomaa J. (2010)**, Uuden valtakunnallisen laserkeilaukseen perustuvan korkeusmallituotannon käynnistäminen Maanmittauslaitoksessa, Maanmittaus 85:2, s. 28–37, Viitattu 5.3.14, Verkkojulkaisu: [http://mts.fgi.fi/maanmittaus/numerot/2010/2010\\_2\\_vilhomaa.pdf](http://mts.fgi.fi/maanmittaus/numerot/2010/2010_2_vilhomaa.pdf)

**Wehr A. ja Lohr U. (1999)**, Airborne laser scanning – an introduction and overview, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54 (1999), s. 68–82, Viitattu 25.8.14, Verkkojulkaisu: <http://warnercnr.colostate.edu/~lefsky/isprs/1136.pdf>

**Bilker M. ja Kaartinen H. (2001)**, The Quality of Real-Time Kinematic (RTK) GPS Positioning, Suomen Geodeettisen laitoksen tiedonantoja, 2001:1, Kirkkonummi, 25 s., ISBN 951-711-241-6, Viitattu 11.9.14

**Cronvall T., Kråknäs P. ja Turkka T. (2012)**, Laserkeilauksen käyttö liikennetunneleiden kunnossapidon hallinnassa, Helsinki: Liikennevirasto, 84 s., Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 41/2012, Viitattu: 18–19.2.2014, Verkkojulkaisu: [http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lts\\_2012-41\\_laserkeilauksen\\_kaytto\\_web.pdf](http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lts_2012-41_laserkeilauksen_kaytto_web.pdf)

**Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO, Yhdistyneiden kansakuntien elintarvike- ja maatalousjärjestö (2010)**, Global Forest Resources Assessment 2010, Main report, Italia, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 340 s., ISBN: 978-92-5-106654-6, Viitattu 8.8.14, Verkkojulkaisu: <http://www.fao.org/docrep/013/i1757e/i1757e.pdf>

**Holopainen M., Hyyppä J. ja Vastaranta M. (2013)**, Laserkeilaus metsävarojen hallinnassa, Kirja, Viitattu 3.4.14, 10.4.14, Verkkojulkaisu: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/42935>

**Kaartinen H. (2013)**, Benchmarking of airborne laser scanning based feature extraction methods and mobile laser scanning system performance based on high-quality test fields, Väitöskirja, Geodeettinen laitos, Kirkkonummi, 346 s., ISBN (painettu): 978-951-711-304-5

**Kaartinen H. ja Hyyppä J. (2008)**, Euros SDR/ISPRS Project, Commission II “Tree Extraction”, Final Report, EuroSDR – European Spatial Data Research, 56 s., Official Publication Nro 53

**Kukko A. (2009)**, Road Environment Mapper – 3D data capturing with mobile mapping, Lisensiaatintyö, Teknillinen korkeakoulu, Kirkkonummi, 158 s.

**Kukko A. (2013)**, Mobile laser scanning – system development, performance and applications, Väitöskirja, Geodeettinen laitos, Kirkkonummi, 247 s., ISBN (painettu): 978-951-711-306-9

**Mellin I. (2006)**, Tilastolliset menetelmät, Luvut 1–3, Teknillinen korkeakoulu, Espoo, 50 s., Viitattu 7.8.14, Verkkojulkaisu: <http://math.aalto.fi/opetus/sovtoda/oppikirja/Johdanto.pdf>

**Pesonen A. (2011)**, Comparison of field inventory methods and use of airborne laser scanning for assessing coarse woody debris, Väitöskirja, Metsätieteellinen seura, Metsäntutkimuslaitos, Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta, Itä-Suomen yliopiston



Metsätieteiden osasto, Vantaa, 56 s., ISSN: 1795-7389, Viitattu 23.9.14, Verkkojulkaisu: <http://www.metla.fi/dissertationes/df113.pdf>

**Poutanen M. (1998)**, GPS-paikanmääritys, Ursan julkaisuja 63, Tähtitieteellinen yhdistys Ursa, Helsinki, 269 s., ISBN 951-9269-89-4, Viitattu 23.9.14

**Price W.F. ja Uren J. (1989)**, Laser surveying, Van Nostrand Reinhold International, Lontoo, 256 s., Viitattu 25.8.14

**Tikka M. (1987)**, Käytännön Geodesia I: Mittaustekniikan perusteet ja rakennusteknilliset sovellutukset, Nro 495, Otakustantamo, Espoo, 443 s., ISBN: 951-672-073-0, Viitattu 5.9.14

**Vosselman G. ja Maas H-G. (2010)**, Airborne and Terrestrial Laser Scanning, Scotland, UK, Whittles Publishing, 318 s., ISBN: 978-1904445-87-6, Viitattu 8.8.14

**Wells D., Beck N., Delikaraoglou D., Kleusberg A., Krakiwsky E. J., Lachapelle G., Langley R. B., Nakiboglu M., Schwarz K-P., Tranquilla J. M. ja Vaníček P. (1986)**, Guide to GPS Positioning, Canadian GPS Associates, Fredericton N. B., Canada, ISBN: 0-920-114-73-3, Viitattu 5.9.14

**Hyypä H., Ahlavo M. ja Kukko A. (2009)**, Lähilaserkeilauksella kohde kolmiulotteiseksi, Positio, 1/2009, s. 18–21, Viitattu 27.2.14, Verkkojulkaisu: [https://www.paikkatietoikkuna.fi/c/document\\_library/get\\_file?uuid=b9b082a3-7c49-47ee-8d34-238b5ef688c3&groupId=108478](https://www.paikkatietoikkuna.fi/c/document_library/get_file?uuid=b9b082a3-7c49-47ee-8d34-238b5ef688c3&groupId=108478)

**Kukko A. ja Jaakkola A. (2011)**, Liikkuva kartoitus tiedon tuotannon etulinjassa, Maankäyttö-lehti, 1/2011, s. 14–16, Viitattu 19.2.14, Verkkojulkaisu: [http://www.maankaytto.fi/arkisto/mk111/mk111\\_1440\\_kukko.pdf](http://www.maankaytto.fi/arkisto/mk111/mk111_1440_kukko.pdf)

**Tötterström S. (2000)**, GPS RTK-Network ja virtuaalitukiasema (VRS) GPS-mittauksen uusi ulottuvuus, Maankäyttö-lehti, 5/2000, s. 41–43, Viitattu 11.9.14, Verkkojulkaisu: [http://www.maankaytto.fi/arkisto/mk500/mk500\\_387\\_totterstrom.pdf](http://www.maankaytto.fi/arkisto/mk500/mk500_387_totterstrom.pdf)

**Vaaja M. (2012)**, Laserkeilauksella yksityiskohtaista tietoa jokiympäristöistä, Positio, 4/2012, s. 13–15, Viitattu 26.2.14, Verkkojulkaisu: [https://www.paikkatietoikkuna.fi/c/document\\_library/get\\_file?uuid=89892127-bc88-424d-af60-d1afe355aace&groupId=108478](https://www.paikkatietoikkuna.fi/c/document_library/get_file?uuid=89892127-bc88-424d-af60-d1afe355aace&groupId=108478)

**Asprs (2014)**, LASer (LAS) File Format Exchange Activities, asprs, The Imaging & Geospatial Information Society, Maryland, Yhdysvallat, Viitattu 19.3.14, Verkkojulkaisu: <http://www.asprs.org/Committee-General/LASer-LAS-File-Format-Exchange-Activities.html>

**Image Analyst -nimimerkki (2012)**, how to read data file with rows of different length, Matlab Central -keskustelualue, Matlab Answers, Matlab-ohjelmakoodi, Viitattu 16.6.14, Verkkojulkaisu: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/answers/54068-how-to-read-data-file-with-rows-of-different-length>

**Jacobs University (2012)**, New tool for archeologists: Jacobs robot Irma generates 3D models of ancient Roman site, Jacobs University, Bremen, Www-sivu, Viitattu 10.3.14, Verkkojulkaisu: <http://www.jacobs-university.de/2012/09/new-tool-archeologists-jacobs-robot-irma-generates-3d-models-ancient-roman-site>

**Kukko A. (2005)**, Laserkeilaimen valinta lähifotogrammetrisiin mittaustehtäviin, Fotogrammetrian erikoistyö, Teknillinen korkeakoulu, Espoo, 24 s., Viitattu 24.2.14, Verkkojulkaisu: [http://foto.hut.fi/opetus/290/julkaisut/Antero\\_Kukko/Laserkeilaimen\\_valinta\\_lahifotogrammetrisiin\\_mittauksiin.pdf](http://foto.hut.fi/opetus/290/julkaisut/Antero_Kukko/Laserkeilaimen_valinta_lahifotogrammetrisiin_mittauksiin.pdf)

**Puttonen E. & Litkey P. (2014)**, GL matlas\_tools, Geodeettinen laitos, Ohjelmakoodi Matlab-sovellukselle, Viitattu 14.7.14, Verkkojulkaisu: <http://www.fgi.fi/fgi/fi/julkaisut/avoimet-sovellukset-ja-ty%C3%B6kalut>

**RIEGL Laser Measurement Systems GmbH (2014)**, RIEGL Laser Measurement Systems, RIEGL VMX-450 Datasheet, Www-sivu, Viitattu 10.9.14, Verkkojulkaisu: [http://www.riegl.com/uploads/tx\\_pxpriegldownloads/10\\_DataSheet\\_VMX-450\\_20-09-2012.pdf](http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/10_DataSheet_VMX-450_20-09-2012.pdf)

**Schreiber E. (2009)**, Kabsch, Ohjelmakoodi, Viitattu 25.6.14, Verkkojulkaisu: <http://www.mathworks.com.au/matlabcentral/fileexchange/25746-kabsch-algorithm>

**Soininen A. (2012 a)**, New Features in TerraScan, Terrasolid, Viitattu 27.3.14 ja 14.7.14, Verkkojulkaisu: [https://www.terrasolid.com/download/presentations/2012/scan\\_new\\_levi\\_2012.pdf](https://www.terrasolid.com/download/presentations/2012/scan_new_levi_2012.pdf)

**Soininen A. (2012 b)**, TerraScan User's Guide, Terrasolid, s. 1–311, Viitattu 8.7.14, Verkkojulkaisu: <https://www.terrasolid.com/download/tscan.pdf>

**Terrasolid (2011)**, TerraMatch Introduction, Viitattu 11.4.14, Verkkojulkaisu: [https://www.terrasolid.com/download/presentations/2011/TMatch\\_training01.pdf](https://www.terrasolid.com/download/presentations/2011/TMatch_training01.pdf)

**Tolonen J. (2011)**, Terrestriaalisen laserkeilaimen tosiaikainen orientointi virtuaali-RTK (Real Time Kinematic) – menetelmällä, Diplomityö, Aalto-yliopiston Insinööritieteiden korkeakoulu, Espoo, 95+21 s., Viitattu 21.2.14, Verkkojulkaisu: <http://koti.mbnet.fi/jtolonen/artikkelit/dtyo.pdf>

**Jaakkola A. (2014)**, Vanhempi tutkija, DI, Geodeettinen laitos, Keskustelu 18.6.14

**Kukko A. (2014)**, Tutkimuspäällikkö, TkT, Geodeettinen laitos, Keskustelu 13.3.14

## Liitteet

### Liite 1. Vertailutaulukot (1/20)

**Vertailu 1. Yhteensovitetut ennen yhteensovitusta-Vertausaineisto**

Pistejoukko	Keskiarvo dh (it- seisarvo) (m)	Minimi dh (m)	Maksimi dh (m)	Keskihajonta SD (m)
1	0,1382	-5,6880	0,2470	0,0361
15	0,1107	0,0390	0,1990	0,0100
25	0,1174	-0,3200	0,2030	0,0198
33	0,0980	-0,6700	0,5020	0,0548
40	0,0998	-2,0600	0,4910	0,4260
101	0,1400	-2,0580	0,4920	0,4940
151	0,1004	-1,8930	0,4920	0,4253
161	0,0342	-1,7580	0,4920	0,3241
192	0,0037	-1,6020	0,4920	0,2455
193	0,0172	-1,5130	0,4920	0,1924
230	0,0006	-0,4230	0,2490	0,1292
267	0,0515	-1,1900	0,1050	0,1037
278	0,0995	0,0510	0,1590	0,0080
360	0,0991	0,0260	0,3370	0,0102
365	0,0857	-0,8540	0,1670	0,0532
416	0,0862	-0,7980	0,6570	0,0606
421	0,0864	-0,6930	0,6570	0,0613
480	0,0888	-0,7010	0,2280	0,0504
545	0,0890	-0,7010	0,2280	0,0498
591	0,0890	-0,7010	0,2280	0,0443
607	0,1337	-0,3690	0,1750	0,0275
614	0,1421	0,1060	0,2540	0,0105
620	0,1194	-5,7330	0,1560	0,0426
621	0,0565	-0,4130	0,1640	0,0638

---

---

---

---

---

1303	0,3011	-6,4910	1,1840	0,3604
1310	0,1988	-2,7840	0,5930	0,1115
1318	0,1092	-0,9390	0,4830	0,1341
1319	0,1093	-0,9390	0,4830	0,1341
1331	0,0727	-0,8310	0,3440	0,0693
1340	0,0135	-0,5820	0,4950	0,0688
1351	0,1344	-0,4610	0,4700	0,1095
1361	0,2004	-0,1420	0,6340	0,0794
1367	0,1954	-0,2960	0,7420	0,0790
1376	0,1785	-0,1740	0,5720	0,0700
1407	0,1547	-0,4970	0,8450	0,0954
1420	0,1988	-2,7830	0,5930	0,1114
1421	0,1698	-0,3350	0,4950	0,0694
1422	0,1927	-0,2960	0,7420	0,0771
1423	0,1077	-0,4880	0,2020	0,0456
1424	0,1078	-0,4880	0,1870	0,0449
1431	0,1338	-0,3690	0,1750	0,0262
1433	0,1422	0,1060	0,2540	0,0106

## Vertailu 2. Yhteensovitetut-Vertausaineisto

Pistejoukko	Keskiarvo dh (it- seisarvo) (m)	Minimi dh (m)	Maksimi dh (m)	Keskihajonta SD (m)
1	0,1396	-0,0210	0,2540	0,0282
15	0,1118	0,0610	0,2040	0,0126
25	0,1156	-0,3360	0,3160	0,0207
33	0,1075	-0,2460	0,6170	0,0421
40	0,0649	-1,4330	1,1690	0,2911
101	0,0269	-0,9550	1,1450	0,2502
151	0,0257	-0,9340	1,2250	0,2471
161	0,0321	-0,7870	1,5070	0,1948
192	0,0427	-0,6750	1,4310	0,1649
193	0,0452	-0,6090	1,3570	0,1473
230	0,0010	-0,4130	0,2580	0,1161
267	0,0083	-1,4370	0,4570	0,2297
278	0,1263	-0,2820	0,4410	0,0731
360	0,1513	-0,2390	0,4530	0,1086

365	0,0852	-0,7210	0,2400	0,0480
416	0,0875	-0,6820	0,2840	0,0479
421	0,0859	-0,6780	0,2810	0,0484
480	0,0837	-0,6850	0,2810	0,0466
545	0,0864	-0,7020	0,2820	0,0403
591	0,0866	-0,7170	0,2850	0,0420
607	0,1340	-0,4490	0,2820	0,0202
614	0,1474	-0,4890	0,2880	0,0298
620	0,1236	-0,2010	0,2220	0,0350
621	0,0737	-0,4710	0,4240	0,0814

1303	0,1797	-1,0720	0,5620	0,3020
1310	0,0579	-3,0130	0,3990	0,1017
1318	0,0282	-0,7970	0,5810	0,1272
1319	0,0287	-0,7960	0,5860	0,1277
1331	0,0163	-0,8000	0,4890	0,1387
1340	0,1221	-0,3550	0,7360	0,1107
1351	0,4807	-0,1950	0,9920	0,1416
1361	0,1104	-0,3560	0,5150	0,1254
1367	0,1631	-0,3580	0,7630	0,0954
1376	0,2929	-0,0830	0,7230	0,1172
1407	0,3584	-0,4320	0,9310	0,1115
1420	0,0542	-2,9520	0,4000	0,1012
1421	0,0706	-0,4050	0,4400	0,1098
1422	0,1641	-0,3640	0,7610	0,0921
1423	0,1076	-0,4880	0,1820	0,0451
1424	0,1078	-0,4880	0,2020	0,0451
1431	0,1341	-0,2710	0,2810	0,0203
1433	0,1462	-0,1290	0,2660	0,0274

**Yhteensovitettut ennen yhteen-  
sovitusta-Vertausaineisto ja  
Yhteensovitettut-Vertausaineisto**

Keskiarvo dh (itseisarvoista) (m)	Minimi dh (itseisarvoista) (m)	Maksimi dh (itseisarvoista) (m)	Keskihajonta (SD) (m)	Pistejoukko
-0,0014	5,6670	-0,0070	0,0079	1
-0,0011	-0,0220	-0,0050	-0,0026	15
0,0018	-0,0160	-0,1130	-0,0009	25
-0,0095	0,4240	-0,1150	0,0127	33
0,0349	0,6270	-0,6780	0,1349	40
0,1131	1,1030	-0,6530	0,2438	101
0,0747	0,9590	-0,7330	0,1782	151
0,0021	0,9710	-1,0150	0,1293	161

-0,0390	0,9270	-0,9390	0,0806	192
-0,0280	0,9040	-0,8650	0,0451	193
-0,0004	0,0100	-0,0090	0,0131	230
0,0432	-0,2470	-0,3520	-0,1260	267
-0,0268	-0,2310	-0,2820	-0,0651	278
-0,0522	-0,2130	-0,1160	-0,0984	360
0,0005	0,1330	-0,0730	0,0052	365
-0,0013	0,1160	0,3730	0,0127	416
0,0005	0,0150	0,3760	0,0129	421
0,0051	0,0160	-0,0530	0,0038	480
0,0026	-0,0010	-0,0540	0,0095	545
0,0024	-0,0160	-0,0570	0,0023	591
-0,0003	-0,0800	-0,1070	0,0073	607
-0,0053	-0,3830	-0,0340	-0,0193	614
-0,0042	5,5320	-0,0660	0,0076	620
-0,0172	-0,0580	-0,2600	-0,0176	621

0,1214	5,4190	0,6220	0,0584	1303
0,1409	-0,2290	0,1940	0,0098	1310
0,0810	0,1420	-0,0980	0,0069	1318
0,0806	0,1430	-0,1030	0,0064	1319
0,0564	0,0310	-0,1450	-0,0694	1331
-0,1086	0,2270	-0,2410	-0,0419	1340
-0,3463	0,2660	-0,5220	-0,0321	1351
0,0900	-0,2140	0,1190	-0,0460	1361
0,0323	-0,0620	-0,0210	-0,0164	1367
-0,1144	0,0910	-0,1510	-0,0472	1376
-0,2037	0,0650	-0,0860	-0,0161	1407
0,1446	-0,1690	0,1930	0,0102	1420
0,0992	-0,0700	0,0550	-0,0404	1421
0,0286	-0,0680	-0,0190	-0,0150	1422
0,0001	0,0000	0,0200	0,0005	1423
0,0000	0,0000	-0,0150	-0,0002	1424
-0,0003	0,0980	-0,1060	0,0059	1431
-0,0040	-0,0230	-0,0120	-0,0168	1433

Vertailu 3. Alkuperäiset-Yhteensovitetut

Pistejoukko	Keskiarvo dh (it- seisarvo) (m)	Minimi dh (m)	Maksimi dh (m)	Keskihajonta (SD) (m)
1	0,0014	-0,1606	0,1827	0,0550
15	0,0003	-0,6402	0,0757	0,0123

25	0,0000	-0,6338	0,1036	0,0122
33	0,0066	-0,3032	0,4137	0,0620
40	0,0252	-0,1328	2,2920	0,1591
101	0,0229	-0,1386	2,0785	0,1441
151	0,0210	-0,1424	2,0731	0,1356
161	0,0175	-0,1409	1,8278	0,1210
192	0,0151	-0,1633	1,7518	0,1120
193	0,0106	-0,2708	1,6897	0,0918
230	0,0007	-0,1639	0,2339	0,0177
267	0,0025	-0,3177	0,2529	0,0654
278	0,0013	-1,8183	0,1800	0,0339
360	0,0009	-0,9924	0,1633	0,0289
365	0,0014	-0,1766	0,4603	0,0551
416	0,0046	-0,5884	0,3089	0,0341
421	0,0036	-0,5927	0,3223	0,0351
480	0,0022	-0,1706	0,3340	0,0375
545	0,0029	-0,1645	0,3642	0,0364
591	0,0023	-0,1588	0,2620	0,0257
607	0,0004	-0,6336	0,1596	0,0208
614	0,0000	-0,6439	0,1843	0,0224
620	0,0014	-0,1470	0,1637	0,0505
621	0,0007	-0,2000	0,3548	0,0358
653	0,0037	-1,3705	0,3028	0,1165
676	0,0091	-0,9579	5,5418	0,1009
716	0,0153	-0,9856	0,6587	0,1188
796	0,0049	-1,2600	0,3235	0,0985
836	0,0078	-1,2982	0,8290	0,1005
906	0,0093	-1,3592	0,2978	0,1054
908	0,0107	-1,5004	1,2694	0,1678
961	0,0068	-1,4541	1,3612	0,1609
970	0,0011	-0,3130	0,3822	0,0660
1000	0,0008	-0,3144	0,4355	0,0701
1023	0,0017	-0,2454	0,2732	0,0442
1056	0,0025	-1,1682	0,6035	0,0876
1145	0,0381	-0,7769	1,1656	0,1801
1206	0,0283	-0,7567	1,1103	0,1800
1275	0,0031	-1,2120	0,5752	0,1043
1303	0,0009	-8,3420	7,6183	0,1875
1310	0,0055	-0,3535	0,4170	0,0885
1318	0,0048	-5,3471	0,7596	0,0864
1319	0,0051	-5,3258	0,7571	0,0829
1331	0,0169	-0,4317	0,5418	0,1390
1340	0,0044	-0,6293	0,4892	0,1326
1351	0,0061	-0,5416	0,4075	0,1063

1361	0,0075	-0,3517	0,3843	0,0921
1367	0,0003	-0,9018	0,4597	0,0922
1376	0,0080	-0,4847	0,6247	0,1324
1407	0,0004	-0,8283	7,2982	0,1218
1420	0,0054	-0,3475	0,4153	0,0877
1421	0,0066	-0,4024	0,3576	0,1009
1422	0,0009	-0,8865	0,4756	0,0910
1423	0,0001	-0,0500	0,0540	0,0013
1424	0,0000	-0,0630	0,0540	0,0013
1431	0,0001	-0,6180	0,1213	0,0137
1433	0,0002	-0,6355	0,1087	0,0262

#### Vertailu 4. Alkuperäiset

Pistejoukko	Keskiarvo dh (it- seisarvo) (m)	Minimi dh (m)	Maksimi dh (m)	Keskihajonta (SD) (m)
1	0,0286	-0,0840	5,8360	0,0252
15	0,0036	-0,6570	0,0550	0,0089
25	0,0041	-0,6570	0,1080	0,0099
33	0,0123	-0,4630	0,2660	0,0178
40	0,0140	-0,8000	2,0800	0,0466
101	0,0131	-0,7990	2,0830	0,0462
151	0,0117	-0,7990	1,8190	0,0449
161	0,0109	-0,7990	1,7990	0,0406
192	0,0109	-0,7990	1,5910	0,0377
193	0,0112	-0,7990	1,5860	0,0357
230	0,0006	-0,2110	0,1910	0,0312
267	0,0073	-0,1700	0,2140	0,0226
278	0,0046	-1,7340	0,2130	0,0301
360	0,0056	-0,8230	0,1630	0,0204
365	0,0012	-0,1500	0,1160	0,0121
416	0,0101	-0,6020	0,2560	0,0291
421	0,0101	-0,6020	0,2560	0,0283
480	0,0101	-0,2230	0,2560	0,0262
545	0,0124	-0,2230	0,5150	0,0416
591	0,0094	-0,2230	0,3620	0,0259
607	0,0220	-0,3270	0,1930	0,0120
614	0,0201	-0,1430	0,0290	0,0089
620	0,0286	-0,0840	5,8370	0,0256
621	0,0533	-0,1250	0,3200	0,0281
653	0,0314	-1,4180	0,1480	0,0684



676	0,0933	-1,0070	5,6450	0,2058
716	0,1985	-1,0070	1,1010	0,2981
796	0,0028	-0,2190	1,2610	0,0329
836	0,0007	-0,2190	1,2610	0,0337
906	0,0036	-0,1510	1,2610	0,0342
908	0,0085	-0,1450	1,2610	0,0352
961	0,0104	-0,1720	1,2610	0,0344
970	0,0337	-0,2130	0,3190	0,0271
1000	0,0380	-0,2130	0,2440	0,0282
1023	0,0295	-0,1290	0,2470	0,0363
1056	0,0298	-1,2360	0,6810	0,0833
1145	0,1263	-0,6880	1,2290	0,2209
1206	0,1356	-0,6880	1,2290	0,2243
1275	0,0294	-1,2360	0,6810	0,1041
1303	0,5424	-8,8340	7,2150	0,1985
1310	0,0896	-0,4180	0,3930	0,1018
1318	0,0690	-5,2890	1,0790	0,0917
1319	0,0688	-5,2890	1,0790	0,0916
1331	0,0682	-0,5980	0,3790	0,1237
1340	0,2265	-0,3290	0,6650	0,0873
1351	0,3734	-0,1670	0,8440	0,1154
1361	0,0569	-0,4350	0,2040	0,0749
1367	0,0020	-0,8340	0,2640	0,0542
1376	0,1716	-0,2400	0,8010	0,1120
1407	0,1861	-0,7080	7,4460	0,1317
1420	0,0898	-0,4180	0,3930	0,1034
1421	0,0573	-0,4350	0,2040	0,0752
1422	0,0017	-0,8340	0,2640	0,0543
1423	0,0001	-0,0450	0,0540	0,0011
1424	0,0001	-0,0450	0,0540	0,0011
1431	0,0220	-0,3270	0,2880	0,0120
1433	0,0202	-0,1430	0,0290	0,0089

**Alkuperäiset ja Alkuperäiset-  
Yhteensovitetut**

Keskiarvo dh (itseisarvoista) (m)	Minimi dh (itseisarvoista) (m)	Maksimi dh (itseisarvoista) (m)	Keskihajonta (SD) (m)	Pistejoukko
0,0272	-0,0766	5,6533	-0,0298	1
0,0033	0,0168	-0,0207	-0,0034	15
0,0041	0,0232	0,0044	-0,0023	25
0,0057	0,1598	-0,1477	-0,0442	33
-0,0112	0,6672	-0,2120	-0,1125	40
-0,0098	0,6604	0,0045	-0,0979	101
-0,0093	0,6566	-0,2541	-0,0907	151

-0,0066	0,6581	-0,0288	-0,0804	161
-0,0042	0,6357	-0,1608	-0,0743	192
0,0006	0,5282	-0,1037	-0,0561	193
-0,0001	0,0471	-0,0429	0,0135	230
0,0048	-0,1477	-0,0389	-0,0428	267
0,0033	-0,0843	0,0330	-0,0038	278
0,0047	-0,1694	-0,0003	-0,0085	360
-0,0002	-0,0266	-0,3443	-0,0430	365
0,0055	0,0136	-0,0529	-0,0050	416
0,0065	0,0093	-0,0663	-0,0068	421
0,0079	0,0524	-0,0780	-0,0113	480
0,0095	0,0585	0,1508	0,0052	545
0,0071	0,0642	0,1000	0,0002	591
0,0216	-0,3066	0,0334	-0,0088	607
0,0201	-0,5009	-0,1553	-0,0135	614
0,0272	-0,0630	5,6733	-0,0249	620
0,0526	-0,0750	-0,0348	-0,0077	621
0,0277	0,0475	-0,1548	-0,0481	653
0,0842	0,0491	0,1032	0,1049	676
0,1832	0,0214	0,4423	0,1793	716
-0,0021	-1,0410	0,9375	-0,0656	796
-0,0071	-1,0792	0,4320	-0,0668	836
-0,0057	-1,2082	0,9632	-0,0712	906
-0,0022	-1,3554	-0,0084	-0,1326	908
0,0036	-1,2821	-0,1002	-0,1265	961
0,0326	-0,1000	-0,0632	-0,0389	970
0,0372	-0,1014	-0,1915	-0,0419	1000
0,0278	-0,1164	-0,0262	-0,0079	1023
0,0273	0,0678	0,0775	-0,0043	1056
0,0882	-0,0889	0,0634	0,0408	1145
0,1073	-0,0687	0,1187	0,0443	1206
0,0263	0,0240	0,1058	-0,0002	1275
0,5415	0,4920	-0,4033	0,0110	1303
0,0841	0,0645	-0,0240	0,0133	1310
0,0642	-0,0581	0,3194	0,0053	1318
0,0637	-0,0368	0,3219	0,0087	1319
0,0513	0,1663	-0,1628	-0,0153	1331
0,2221	-0,3003	0,1758	-0,0453	1340
0,3673	-0,3746	0,4365	0,0091	1351
0,0494	0,0833	-0,1803	-0,0172	1361
0,0017	-0,0678	-0,1957	-0,0380	1367
0,1636	-0,2447	0,1763	-0,0204	1376
0,1857	-0,1203	0,1478	0,0099	1407
0,0844	0,0705	-0,0223	0,0157	1420
0,0507	0,0326	-0,1536	-0,0257	1421
0,0008	-0,0525	-0,2116	-0,0367	1422
0,0000	-0,0050	0,0000	-0,0002	1423
0,0001	-0,0180	0,0000	-0,0002	1424
0,0219	-0,2910	0,1667	-0,0017	1431

0,0200	-0,4925	-0,0797	-0,0173	1433
--------	---------	---------	---------	------

**Vertailu 1. Yhteensovitetut ennen yhteensovitusta - Vertausaineisto**

Pistejoukko	Keskiarvo dE (it- seisarvo) (m)	Keskiarvo dN (it- seisarvo) (m)	Kiertokulma (heading) (°)	Keskiarvo dh (it- seisarvo) (m)
1	0,0037	0,0555	91,42	0,1382
15	0,0024	0,1158	8,96	0,1107
25	0,1631	0,0866	97,07	0,1174
33	0,4587	0,1168	34,43	0,0980
40	1,0402	0,2671	24,39	0,0998
101	1,1173	0,2989	48,03	0,1400
151	1,3363	0,3934	20,11	0,1004
161	0,8987	0,1504	98,02	0,0342
192	0,9233	0,2096	104,42	0,0037
193	1,0902	0,2929	96,31	0,0172
230	0,0233	0,0377	114,67	0,0006
267	0,4014	0,3112	51,92	0,0515
278	0,1344	0,0917	58,97	0,0995
360	0,2509	0,1424	103,63	0,0991
365	0,1131	0,2777	75,16	0,0857
416	0,2649	0,0325	84,65	0,0862
421	0,0632	0,1483	94,72	0,0864
480	0,0450	0,1159	101,29	0,0888
545	0,1913	0,1637	99,99	0,0890
591	0,2970	0,1640	78,37	0,0890
607	0,1708	0,0689	48,71	0,1337
614	0,0855	0,1666	34,83	0,1421
620	0,0575	0,0986	61,10	0,1194
621	0,1432	0,0055	93,40	0,0565

---	---	---	---	---
1303	0,1192	0,4648	35,46	0,3011
1310	0,0394	0,1396	26,78	0,1988
1318	0,0130	0,0734	107,71	0,1092
1319	0,0186	0,0857	112,07	0,1093
1331	0,0156	0,0760	68,55	0,0727
1340	0,0299	0,0504	41,61	0,0135
1351	0,0136	0,1351	20,88	0,1344
1361	0,0457	0,1311	22,03	0,2004
1367	0,0058	0,1097	24,74	0,1954
1376	0,0234	0,0939	92,57	0,1785
1407	0,0018	0,1714	13,47	0,1547

1420	0,0441	0,0958	90,28	0,1988
1421	0,0410	0,0697	78,53	0,1698
1422	0,0863	0,1434	9,65	0,1927
1423	0,2725	0,1110	76,83	0,1077
1424	0,4895	0,0639	38,83	0,1078
1431	0,1399	0,1226	55,75	0,1338
1433	0,3304	0,1017	90,37	0,1422

## Vertailu 2. Yhteensovitetut - Vertausaineisto

Pistejoukko	Keskiarvo dE (it- seisarvo) (m)	Keskiarvo dN (it- seisarvo) (m)	Kiertokulma (heading) (°)	Keskiarvo dh (it- seisarvo) (m)
1	0,6638	0,3432	111,51	0,1396
15	0,7634	0,1145	12,02	0,1118
25	0,2605	0,0598	37,44	0,1156
33	0,3229	0,1414	31,61	0,1075
40	0,1395	0,1230	97,55	0,0649
101	0,2577	0,1438	81,21	0,0269
151	0,1422	0,0816	101,96	0,0257
161	0,1104	0,1335	98,72	0,0321
192	0,1131	0,1437	99,79	0,0427
193	0,0710	0,1525	87,31	0,0452
230	0,1542	0,2827	56,56	0,0010
267	0,0156	0,1777	90,93	0,0083
278	0,9079	0,0447	76,30	0,1263
360	1,2660	0,1045	79,97	0,1513
365	0,1378	0,1032	89,70	0,0852
416	0,3350	0,1201	97,46	0,0875
421	0,4420	0,2204	26,60	0,0859
480	0,4661	0,2537	19,83	0,0837
545	0,5559	0,2700	19,29	0,0864
591	0,5998	0,2940	18,86	0,0866
607	0,1001	0,2022	23,82	0,1340
614	0,2087	0,1166	52,74	0,1474
620	0,3343	0,1327	110,74	0,1236
621	0,1206	0,0603	102,82	0,0737

1303	0,1927	0,2138	64,73	0,1797
1310	0,0617	0,0651	55,83	0,0579
1318	0,0251	0,0592	96,63	0,0282
1319	0,0308	0,1116	27,05	0,0287

1331	0,1155	0,0234	60,64	0,0163
1340	0,3548	0,0025	21,56	0,1221
1351	0,2272	0,5202	18,69	0,4807
1361	0,2700	0,0714	14,78	0,1104
1367	0,0801	0,0693	110,91	0,1631
1376	0,0466	0,3124	22,77	0,2929
1407	0,0418	0,0859	94,80	0,3584
1420	0,0092	0,1089	81,37	0,0542
1421	0,2045	0,0422	71,35	0,0706
1422	0,0825	0,0159	106,95	0,1641
1423	0,1396	0,0382	94,76	0,1076
1424	0,2082	0,1578	97,21	0,1078
1431	0,0475	0,0901	107,31	0,1341
1433	0,3062	0,0039	55,72	0,1462

### Vertailu 3. Alkuperäiset-Yhteensovitetut

Pistejoukko	Keskiarvo dE (it- seisarvo) (m)	Keskiarvo dN (it- seisarvo) (m)	Kiertokulma (heading) (°)	Keskiarvo dh (it- seisarvo) (m)
1	4,2809	2,6257	9,75	0,0014
15	0,0573	0,0723	95,99	0,0003
25	0,1649	0,1025	79,41	0,0000
33	0,2189	0,3321	97,14	0,0066
40	0,1219	0,0332	78,31	0,0252
101	0,1897	0,0107	9,36	0,0229
151	0,1896	0,0004	7,97	0,0210
161	0,1103	0,0390	57,66	0,0175
192	0,1688	0,0052	69,80	0,0151
193	0,0907	0,1658	64,36	0,0106
230	0,0019	0,0591	71,27	0,0007
267	0,0080	0,0629	117,37	0,0025
278	0,1465	0,0096	18,70	0,0013
360	0,1344	0,0345	34,18	0,0009
365	0,2044	0,0070	92,27	0,0014
416	0,1921	0,0499	15,23	0,0046
421	0,1948	0,0527	77,04	0,0036
480	0,1785	0,1624	83,72	0,0022
545	0,1567	0,0889	96,81	0,0029
591	0,0899	0,1111	58,36	0,0023
607	0,1476	0,0819	54,82	0,0004
614	0,8560	0,3036	99,01	0,0000
620	3,5948	0,4705	69,68	0,0014

621	0,4480	0,1458	90,79	0,0007
653	0,2027	0,4541	93,44	0,0037
676	0,0864	0,0538	116,94	0,0091
716	0,1202	0,2487	112,75	0,0153
796	0,0378	0,1219	113,31	0,0049
836	0,0155	0,0081	106,19	0,0078
906	0,0270	0,0493	103,02	0,0093
908	0,1485	0,0534	111,49	0,0107
961	0,2042	0,0582	93,43	0,0068
970	0,3727	0,1325	38,32	0,0011
1000	0,5718	0,1737	19,45	0,0008
1023	0,8444	0,6333	48,13	0,0017
1056	0,1159	0,0835	99,70	0,0025
1145	0,0432	0,0693	109,26	0,0381
1206	0,2855	0,1343	61,86	0,0283
1275	0,4534	0,1984	67,96	0,0031
1303	0,0968	0,0880	92,88	0,0009
1310	0,1878	0,0968	78,90	0,0055
1318	0,0856	0,0351	75,89	0,0048
1319	0,0351	0,0274	98,36	0,0051
1331	0,2236	0,1880	91,38	0,0169
1340	0,0907	0,0734	86,06	0,0044
1351	0,1709	0,0963	82,85	0,0061
1361	0,0871	0,0342	98,44	0,0075
1367	0,0595	0,0350	113,31	0,0003
1376	0,0497	0,0669	113,01	0,0080
1407	0,0094	0,0120	95,99	0,0004
1420	0,1438	0,0895	71,12	0,0054
1421	0,0501	0,1166	75,97	0,0066
1422	0,1230	0,0327	104,31	0,0009
1423	0,0097	0,0235	102,97	0,0001
1424	0,0339	0,0137	80,33	0,0000
1431	0,1780	0,0480	107,93	0,0001
1433	0,1231	0,5591	110,32	0,0002

#### Vertailu 4. Alkuperäiset

Pistejoukko	Keskiarvo dE (it- seisarvo) (m)	Keskiarvo dN (it- seisarvo) (m)	Kiertokulma (heading) (°)	Keskiarvo dh (it- seisarvo) (m)
1	0,0303	0,0525	46,95	0,0286
15	0,0136	0,0865	57,62	0,0036
25	0,0193	0,0393	75,40	0,0041

33	0,0581	0,0403	101,98	0,0123
40	0,0256	0,0315	68,29	0,0140
101	0,0609	0,0185	64,73	0,0131
151	0,0143	0,0145	105,33	0,0117
161	0,0331	0,0109	104,72	0,0109
192	0,0478	0,0132	71,33	0,0109
193	0,0325	0,0746	34,50	0,0112
230	0,0836	0,0193	22,25	0,0006
267	0,0492	0,0046	74,41	0,0073
278	0,0707	0,0221	52,02	0,0046
360	0,0108	0,0266	51,25	0,0056
365	0,0929	0,0153	72,99	0,0012
416	0,0419	0,0359	69,91	0,0101
421	0,0492	0,1194	35,06	0,0101
480	0,0121	0,0009	105,51	0,0101
545	0,0246	0,0055	102,34	0,0124
591	0,2632	0,0607	31,32	0,0094
607	0,0135	0,0574	63,09	0,0220
614	0,0719	0,0392	96,83	0,0201
620	0,0080	0,0333	70,09	0,0286
621	0,0106	0,0879	77,22	0,0533
653	0,0077	0,0046	94,09	0,0314
676	0,0925	0,0015	26,82	0,0933
716	0,0089	0,0085	112,62	0,1985
796	0,0464	0,0244	103,90	0,0028
836	0,0031	0,0204	103,58	0,0007
906	0,0420	0,0424	10,27	0,0036
908	0,0743	0,0356	83,56	0,0085
961	0,0568	0,0008	90,07	0,0104
970	0,0271	0,0417	89,79	0,0337
1000	0,0493	0,0333	27,44	0,0380
1023	0,0112	0,0461	92,24	0,0295
1056	0,0237	0,0390	88,11	0,0298
1145	0,4064	0,0918	75,35	0,1263
1206	0,1447	0,1521	110,03	0,1356
1275	0,0646	0,0161	87,57	0,0294
1303	0,0131	0,0432	118,23	0,5424
1310	0,0379	0,1764	42,22	0,0896
1318	0,0636	0,0071	94,35	0,0690
1319	0,0520	0,0010	99,80	0,0688
1331	0,0468	0,0427	76,92	0,0682
1340	0,0142	0,2017	46,74	0,2265
1351	0,0471	0,3483	24,25	0,3734

1361	0,1349	0,0410	8,14	0,0569
1367	0,0288	0,0112	96,75	0,0020
1376	0,0791	0,1653	15,01	0,1716
1407	0,1613	0,2439	45,26	0,1861
1420	0,1528	0,1501	38,84	0,0898
1421	0,0180	0,0858	81,59	0,0573
1422	0,0145	0,0059	115,27	0,0017
1423	0,0063	0,0023	118,80	0,0001
1424	0,0289	0,0066	92,29	0,0001
1431	0,0211	0,0268	95,42	0,0220
1433	0,0402	0,0151	64,01	0,0202

**Yhteensovitetut ennen yhteensovitusta-Vertausaineisto ja Yhteensovitetut-Vertausaineisto**

Keskiarvo dE (itseisarvoista) (m)	Keskiarvo dN (itseisarvoista) (m)	Kiertokulma (heading) (°)	Keskiarvo dh (itseisarvoista) (m)	Enemmistön muutos
-0,6601	-0,2877	-20,09	-0,0014	1
-0,7611	0,0012	-3,06	-0,0011	15
-0,0974	0,0269	59,62	0,0018	25
0,1357	-0,0246	2,82	-0,0095	33
0,9007	0,1441	-73,16	0,0349	40
0,8597	0,1551	-33,18	0,1131	101
1,1941	0,3118	-81,86	0,0747	151
0,7883	0,0170	-0,70	0,0021	161
0,8102	0,0659	4,63	-0,0390	192
1,0193	0,1405	8,99	-0,0280	193
-0,1309	-0,2451	58,11	-0,0004	230
0,3858	0,1335	-39,01	0,0432	267
-0,7736	0,0470	-17,33	-0,0268	278
-1,0151	0,0379	23,65	-0,0522	360
-0,0247	0,1745	-14,54	0,0005	365
-0,0701	-0,0876	-12,81	-0,0013	416
-0,3788	-0,0721	68,12	0,0005	421
-0,4210	-0,1378	81,46	0,0051	480
-0,3646	-0,1063	80,70	0,0026	545
-0,3028	-0,1301	59,51	0,0024	591
0,0707	-0,1333	24,89	-0,0003	607
-0,1231	0,0500	-17,91	-0,0053	614
-0,2768	-0,0342	-49,64	-0,0042	620
0,0226	-0,0548	-9,42	-0,0172	621
---	---	---	---	---
-0,0735	0,2510	-29,27	0,1214	1303
-0,0223	0,0745	-29,04	0,1409	1310



-0,0122	0,0142	11,08	0,0810	1318
-0,0122	-0,0259	85,02	0,0806	1319
-0,0999	0,0527	7,91	0,0564	1331
-0,3249	0,0479	20,05	-0,1086	1340
-0,2136	-0,3852	2,19	-0,3463	1351
-0,2243	0,0598	7,24	0,0900	1361
-0,0743	0,0404	-86,17	0,0323	1367
-0,0233	-0,2185	69,80	-0,1144	1376
-0,0400	0,0855	-81,34	-0,2037	1407
0,0349	-0,0131	8,91	0,1446	1420
-0,1635	0,0275	7,18	0,0992	1421
0,0038	0,1276	-97,30	0,0286	1422
0,1329	0,0728	-17,93	0,0001	1423
0,2813	-0,0939	-58,39	0,0000	1424
0,0925	0,0325	-51,56	-0,0003	1431
0,0241	0,0979	34,65	-0,0040	1433

#### Alkuperäiset ja Alkuperäiset-Yhteensovitetut

Keskiarvo dE (itseisarvoista) (m)	Keskiarvo dN (itseisarvoista) (m)	Kiertokulma (heading) (°)	Keskiarvo dh (itseisarvoista) (m)	Enemmistön muutos
-4,2505	-2,5733	37,21	0,0272	1
-0,0437	0,0142	-38,37	0,0033	15
-0,1456	-0,0632	-4,01	0,0041	25
-0,1609	-0,2918	4,84	0,0057	33
-0,0962	-0,0018	-10,02	-0,0112	40
-0,1288	0,0079	55,37	-0,0098	101
-0,1753	0,0140	97,36	-0,0093	151
-0,0772	-0,0281	47,06	-0,0066	161
-0,1210	0,0080	1,53	-0,0042	192
-0,0582	-0,0912	-29,86	0,0006	193
0,0818	-0,0398	-49,02	-0,0001	230
0,0413	-0,0584	-42,97	0,0048	267
-0,0759	0,0126	33,33	0,0033	278
-0,1236	-0,00795	17,074	0,0047	360
-0,1115	0,008275	-19,282	-0,0002	365
-0,1502	-0,014	54,68	0,0055	416
-0,1456	0,06665	-41,98	0,0065	421
-0,1665	-0,16148	21,79	0,0079	480
-0,1321	-0,0835	5,53	0,0095	545
0,1733	-0,0504	-27,05	0,0071	591
-0,1341	-0,0246	8,27	0,0216	607
-0,7842	-0,2644	-2,18	0,0201	614
-3,5869	-0,4372	0,41	0,0272	620

-0,4373	-0,0579	-13,57	0,0526	621
-0,1949	-0,4495	0,65	0,0277	653
0,0061	-0,0524	-90,12	0,0842	676
-0,1114	-0,2402	-0,14	0,1832	716
0,0086	-0,0976	-9,41	-0,0021	796
-0,0124	0,0123	-2,61	-0,0071	836
0,0151	-0,0069	-92,75	-0,0057	906
-0,0742	-0,0178	-27,92	-0,0022	908
-0,1474	-0,0574	-3,36	0,0036	961
-0,3456	-0,0908	51,47	0,0326	970
-0,5225	-0,1404	7,99	0,0372	1000
-0,8333	-0,5873	44,11	0,0278	1023
-0,0922	-0,0446	-11,60	0,0273	1056
0,3632	0,0225	-33,91	0,0882	1145
-0,1408	0,0178	48,18	0,1073	1206
-0,3889	-0,1823	19,62	0,0263	1275
-0,0838	-0,0448	25,35	0,5415	1303
-0,1499	0,0797	-36,68	0,0841	1310
-0,0220	-0,0280	18,46	0,0642	1318
0,0170	-0,0264	1,44	0,0637	1319
-0,1768	-0,1454	-14,46	0,0513	1331
-0,0765	0,1283	-39,31	0,2221	1340
-0,1239	0,2520	-58,60	0,3673	1351
0,0478	0,0069	-90,31	0,0494	1361
-0,0307	-0,0238	-16,56	0,0017	1367
0,0294	0,0985	-98,00	0,1636	1376
0,1519	0,2319	-50,73	0,1857	1407
0,0090	0,0606	-32,28	0,0844	1420
-0,0321	-0,0308	5,62	0,0507	1421
-0,1085	-0,0268	10,96	0,0008	1422
-0,0034	-0,0213	15,83	0,0000	1423
-0,0051	-0,0071	11,96	0,0001	1424
-0,1569	-0,0212	-12,50	0,0219	1431
-0,0828	-0,5440	-46,31	0,0200	1433

#### Vertailu 1. Yhteensovitettut ennen yhteensovitusta-Vertausaineisto

Kauempana nollasta kuin koko aineiston kes- kiarvo (kpl)	18	10	22	12
Lähempänä nollaa kuin koko aineiston kes- kiarvo (kpl)	24	32	20	30
Kauempana nollasta kuin koko aineiston kes- kiarvo (metsä) (kpl)	10	3	13	5

Lähempänä nollaa kuin koko aineiston keskiarvo (metsä) (kpl)	4	11	1	9
--	---	----	---	---

Kauempana nollasta kuin koko aineiston keskiarvo %	42,86	23,81	52,38	28,57
Lähempänä nollaa kuin koko aineiston keskiarvo %	57,14	76,19	47,62	71,43
Kauempana nollasta kuin koko aineiston keskiarvo %	71,43	21,43	92,86	35,71
Lähempänä nollaa kuin koko aineiston keskiarvo %	28,57	78,57	7,14	64,29

## Vertailu 2. Yhteensovitettut-Vertausaineisto

Kauempana nollasta kuin koko aineiston keskiarvo (kpl)	18	18	16	19
Lähempänä nollaa kuin koko aineiston keskiarvo (kpl)	24	24	26	23
Kauempana nollasta kuin koko aineiston keskiarvo (metsä) (kpl)	8	6	9	10
Lähempänä nollaa kuin koko aineiston keskiarvo (metsä) (kpl)	6	8	5	4

Kauempana nollasta kuin koko aineiston keskiarvo %	42,86	42,86	38,10	45,24
Lähempänä nollaa kuin koko aineiston keskiarvo %	57,14	57,14	61,90	54,76
Kauempana nollasta kuin koko aineiston keskiarvo %	57,14	42,86	64,29	71,43
Lähempänä nollaa kuin koko aineiston keskiarvo %	42,86	57,14	35,71	28,57

Yhteensovitettut ennen yhteensovitusta-Vertausaineisto ja Yhteensovitettut-Vertausaineisto	Keskiarvo dh	Minimi dh	Maksimi dh	Keskihajonta (SD)	Yhteensä
Muuttunut parempaan (kpl)	26	26	8	16	18
Muuttunut huonompaan (kpl)	16	16	34	26	13
Muuttunut parempaan (%)	61,9	61,9	19,05	38,1	42,86
Muuttunut huonompaan (%)	38,1	38,1	80,95	61,9	30,95
Yhtä paljon					26,19
Muuttunut parempaan (metsä) (kpl)	10	8	5	5	5
Muuttunut huonompaan (metsä) (kpl)	4	6	9	9	6
Muuttunut parempaan (%) (metsä)	71,43	57,14	35,71	35,71	35,71
Muuttunut huonompaan (%) (metsä)	28,57	42,86	64,29	64,29	42,86
Yhtä paljon					21,43

### Vertailu 3. Alkuperäiset-Yhteensovitetut

Kauempana nollasta kuin koko aineiston keskiarvo (kpl)	19	16	13	32
Lähempänä nollaa kuin koko aineiston keskiarvo (kpl)	38	41	44	25
Kauempana nollasta kuin koko aineiston keskiarvo (metsä) (kpl)	6	6	4	18
Lähempänä nollaa kuin koko aineiston keskiarvo (metsä) (kpl)	12	12	14	0

Kauempana nollasta kuin koko aineiston keskiarvo %	33,33	28,07	22,81	56,14
Lähempänä nollaa kuin koko aineiston keskiarvo %	66,67	71,93	77,19	43,86
Kauempana nollasta kuin koko aineiston keskiarvo %	33,33	33,33	22,22	100,00
Lähempänä nollaa kuin koko aineiston keskiarvo %	66,67	66,67	77,78	0,00

### Vertailu 4. Alkuperäiset

Kauempana nollasta kuin koko aineiston keskiarvo (kpl)	16	12	18	19
Lähempänä nollaa kuin koko aineiston keskiarvo (kpl)	41	45	39	38
Kauempana nollasta kuin koko aineiston keskiarvo (metsä) (kpl)	14	7	4	16
Lähempänä nollaa kuin koko aineiston keskiarvo (metsä) (kpl)	4	11	14	2

Kauempana nollasta kuin koko aineiston keskiarvo %	28,07	21,05	31,58	33,33
Lähempänä nollaa kuin koko aineiston keskiarvo %	71,93	78,95	68,42	66,67
Kauempana nollasta kuin koko aineiston keskiarvo %	77,78	38,89	22,22	88,89
Lähempänä nollaa kuin koko aineiston keskiarvo %	22,22	61,11	77,78	11,11

Alkuperäiset ja Alkuperäiset-Yhteensovitetut	Keskiarvo dh	Minimi dh	Maksimi dh	Keskihajonta (SD)	Yhteensä
Muuttunut parempaan (kpl)	47	26	27	17	19
Muuttunut huonompaan (kpl)	10	31	30	40	20
Muuttunut parempaan (%)	82,46	45,61	47,37	29,82	33,33
Muuttunut huonompaan (%)	17,54	54,39	52,63	70,18	35,09
Yhtä paljon					31,58

Muuttunut parempaan (metsä) (kpl)	18	8	10	10	11
Muuttunut huonompaan (metsä) (kpl)	0	10	8	8	2
Muuttunut parempaan (%) (metsä)	100,00	44,44	55,56	55,56	61,11
Muuttunut huonompaan (%) (metsä)	0,00	55,56	44,44	44,44	11,11
Yhtä paljon					27,78

Yhteensovitetut ennen yhteensovitusta-Vertausaineisto ja Yhteensovitetut-Vertausaineisto	Keskiarvo dE	Keskiarvo dN	Keskiarvo dh	Kiertokulma (heading)	Enemmistön muutos (ilman kiertokulmaa)	Enemmistön muutos
Muuttunut parempaan (kpl)	16	26	26	22	23	18
Muuttunut huonompaan (kpl)	26	16	16	20	19	10
Muuttunut parempaan (%)	38,10	61,90	61,90	52,38	54,76	42,86
Muuttunut huonompaan (%)	61,90	38,10	38,10	47,62	45,24	23,81
Yhtä paljon						33,33
Muuttunut parempaan (metsä) (kpl)	2	10	10	9	9	6
Muuttunut huonompaan (metsä) (kpl)	12	4	4	5	5	3
Muuttunut parempaan (metsä) (%)	14,29	71,43	71,43	64,29	64,29	42,86
Muuttunut huonompaan (metsä)(%)	85,71	28,57	28,57	35,71	35,71	21,43
Yhtä paljon						35,71

Alkuperäiset ja Alkuperäiset-Yhteensovitetut	Keskiarvo dE	Keskiarvo dN	Keskiarvo dh	Kiertokulma (heading)	Enemmistön muutos (ilman kiertokulmaa)	Enemmistön muutos
Muuttunut parempaan (kpl)	12	17	48	27	18	8
Muuttunut huonompaan (kpl)	45	40	9	30	39	16
Muuttunut parempaan (%)	21,05	29,82	84,21	47,37	31,58	14,04

Muuttunut huonompaan (%)	78,95	70,18	15,79	52,63	68,42	28,07
Yhtä paljon						57,89
Muuttunut parempaan (metsä) (kpl)	6	9	18	7	10	7
Muuttunut huonompaan (metsä) (kpl)	12	9	0	11	8	3
Muuttunut parempaan (metsä) (%)	33,33	50,00	100,00	38,89	55,56	38,89
Muuttunut huonompaan (metsä)(%)	66,67	50,00	0,00	61,11	44,44	16,67
Yhtä paljon						44,44